INVESTIGACION y CIENCIA

FUENTES DE ENERGIA: FOSIL, NUCLEAR Y SOLAR

ENERGIA PARA LA NUEVA EUROPA

ENERGIA, ECONOMIA Y ECOLOGIA

Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN



LA ENERGIA QUE LA TIERRA NECESITA

NOVIEMBRE 1990
650 PTAS.



Noviembre de 1990 Número 170

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
6	Mike y Carol Werner, COMSTOCK, Inc.
8-13	Andrew Christie
14	William Truslow, Stockfile
16-22	Hank Iken
24	SuperStock
26-27	Andrew Christie
28	Hank Iken
29	Laboratorio Lawrence Berkeley
30	Hank Iken
31	Andrew Christie
42	Jack Elness, COMSTOCK, Inc.
44-46	George V. Kelvin
47	Johnson Yokogawa Company
48-49	George V. Kelvin
52	John Moss
54-56	George Retseck
57	Johnny Johnson
58	Sarich Technologies Limited
59	Johnny Johnson
62	Hubertus Kanus, SuperStock
64-65	Michael Goodman
66	Stephanie Maze, Woodfin Camp y Asociados (*arriba*), Michael Goodman (*abajo*)
67-68	Michael Goodman
70-71	SuperStock
74	R. Bossu, Sygma
76-77	Gabor Kiss
78	J. P. Laffont, Sygma
79	Vladimir Sumovsky, *New York Times* Pictures (*izquierda*), Ann y Myron Sutton, SuperStock (*derecha*)
80	Gabor Kiss
84	Shelly Katz, Black Star
86-87	Johnny Johnson
88	Ian Worpole
89	John Deecken
90	Ian Worpole
92	John Deecken
94	SuperStock
96	John Deecken
97-98	Ian Worpole
100	John Deecken
101	SuperStock
104	Jon Brenneis
106	Andrew Christie y Edward Bell
107	Westinghouse Electric Corporation (*arriba, izquierda*), LUZ International Limited (*abajo, izquierda*), Andrew Christie (*derecha*)
108	Gabor Kiss
109-110	Andrew Christie
111	Gabor Kiss
112	Andrew Christie
114	Jay Maisel
116	Gabor Kiss
117-120	Michael Goodman
122	Gabor Kiss
124-127	Andrew Christie
130-137	Documents PLS

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Carmen Hernandez y A. Rivera: *Energía para el planeta Tierra*; Amando García: *Uso rentable de la electricidad*; Juan Pedro Adrados: *Energía para edificios y viviendas*; Pedro Molera y Jesús Peñafiel: *Energía para la industria*; Enrique Zorzano: *Energía para vehículos de motor*; Luis Bou: *Energía para el mundo subdesarrollado*, *Juegos de ordenador* y *Juegos matemáticos*; José M. García de la Mora: *Energía para la Unión Soviética, Europa del este y China*; Inma Tolosa Bertral: *Energía de combustibles fósiles*; Luis de León: *Energía nuclear*; Manuel Puigcerver: *Energía procedente del Sol*; Joandomènec Ros: *La energía en transición*; José Vilardell: *Hace...*

Ciencia y sociedad: Josep-Enric Llebot y Joandomènec Ros

Ciencia y empresa: Manuel Puigcerver y Javier Sancho

Libros: Ramón Margalef, Carmen Rusiñol, Francesc Castelló y Luis Alonso

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal Garfella
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48 Telefax 419 47 82

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Armand Schwab, Jr., *Managing Editor*; Timothy Appenzeller, Laurie Burnham, *Associate Editors*; Timothy M. Beardsley; Elizabeth Corcoran; John Horgan; June Kinoshita; Philip Morrison, *Book Editor*; John Rennie; Philip E. Ros; Ricki L. Rusting; Russell Ruthen, Paul Wallich; Karen Wright
PUBLISHER John J. Moeling, Jr.
ADVERTISING DIRECTOR Robert F. Gregory
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Claus-Gerhard Firchow
CHAIRMAN OF THE BOARD Georg-Dieter von Holtzbrinck
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª
08029 Barcelona (España)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	5500	10.000
Extranjero	6200	11.500

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 500 pesetas
Extraordinario: 650 pesetas

– Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.
– En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.
– El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. 652 42 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48

PUBLICIDAD

Madrid: Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 409 70 45 - Fax 409 70 46

Cataluña: Marcel Klein
M. K. Publicidad
Ortigosa, 14-16, 3º, D. 20
08003 Barcelona
Tel. 268 45 05 - Fax 268 16 07

OJD DIFUSION · PUBLICIDAD

ISSN 0210-136X Dep. legal: B. 38.999-76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por T2, Llull, 145 - 08018 Barcelona
Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de la Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Hace...

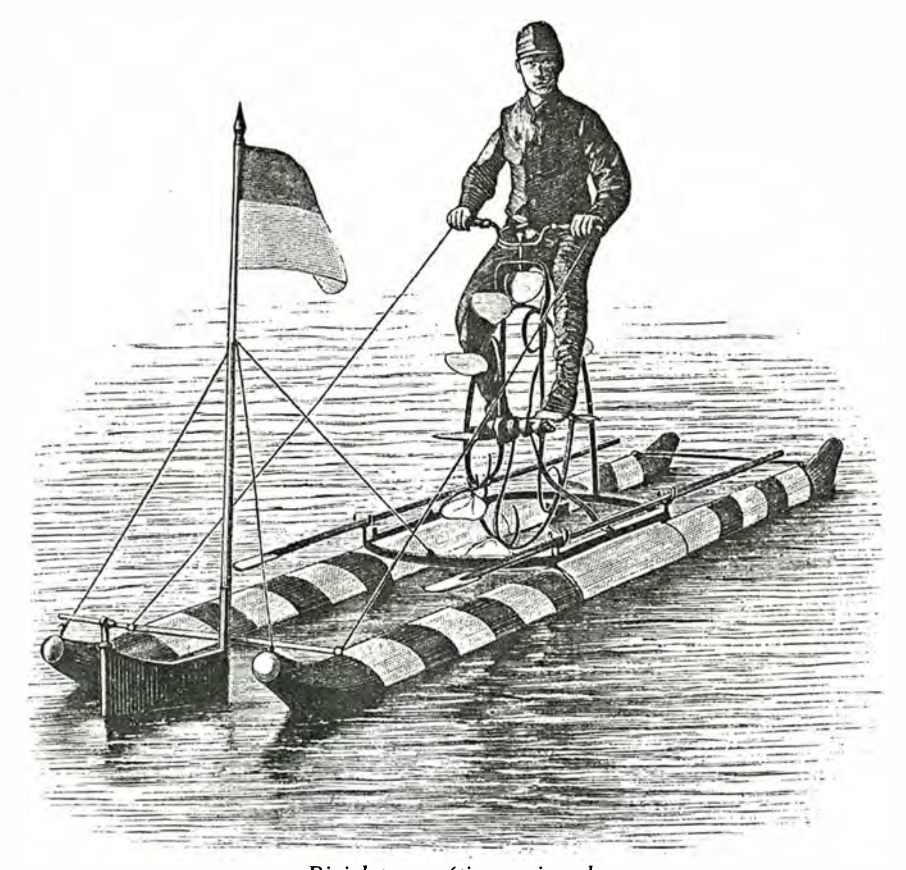
...cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: "Han pasado ya casi dos años desde que Hans Bethe publicó su magnífica descripción de por qué el Sol sigue brillando. El hidrógeno es el combustible; el helio forma las cenizas, y el carbono y el nitrógeno mantienen el proceso en marcha merced a una cadena de reacciones al final de la cual vuelven a formarse. La teoría de Bethe se apoya enteramente en hechos observados. Según los nuevos cálculos, empero, la abundancia de N^{15} en el Sol debería ser sólo de 1/200.000 de la concentración de N^{14}. El isótopo más pesado multiplica unas 800 veces la concentración existente en la Tierra. Además, las rocas terrestres contienen cantidades pequeñas, mas no despreciables, de litio y berilio, cuyos núcleos son los más fáciles de escindir y existirían sólo en proporciones infinitesimales en el interior solar. A menos que se halle una salida a este *impasse*, parece que estamos abocados a la conclusión de que la presencia de estos elementos ligeros constituye un resto de algún estado primitivo del universo, acaso anterior a la existencia de las estrellas."

"Según sugiere el doctor Claude E. ZoBell, del Instituto Scripps de Oceanografía en La Jolla, las bacterias y otros microorganismos gastan el oxígeno del mar con mayor rapidez que los peces y otros animales (ya sean minúsculos camarones o pulpos gigantes). Un litro de agua marina podría contener de 100.000 a 10 millones de bacterias, que consumirían oxígeno a razón de 0,001 a más de un centímetro cúbico por litro y año."

"Con extraordinaria rapidez la soja se ha convertido en un producto industrial. Si ese progreso continúa, podría terminar poniéndose a la altura del maíz en importancia relativa. El aceite de sus semillas se emplea en sopas, pinturas y barnices. Las proteínas que contiene su harina pueden transformarse en pulsadores de claxon, molduras, pequeñas guarniciones y otras piezas de automóviles, al igual que cualquier plástico. En los últimos seis años, la producción norteamericana de soja se ha multiplicado por 17 y sigue en aumento."

"La posibilidad de que el abastecimiento americano de caucho se vea interrumpido se cierne como una amenaza grave, especialmente si las colonias que lo producen cayeran en manos de una de las potencias totalitarias. Para este problema hay dos soluciones que deben ir a la par: la primera, desarrollar rápidamente el caucho sintético; la segunda, establecer fuentes de suministro en el hemisferio occidental. La Ford Motor Company posee un proyecto de veinte millones de dólares para Brasil, que prevé dos plantaciones junto al río Tapajoz, uno de los principales afluentes del Amazonas."



Bicicleta acuática mejorada.

...cien años

SCIENTIFIC AMERICAN: "En una carta dirigida a una revista científica local (*Pacific Record*), el doctor McPherson afirma que ya está irrefutablemente probado que el agua destilada es azul. Un perseverante caballero escocés ha llevado a cabo una serie de experimentos para comprobarlo, y afirma que se verifica fácilmente como sigue. Introdúzcase en agua un tubo de metal (abierto por arriba y con una plana de vidrio transparante en el fondo) en las proximidades de un objeto blanco situado a cinco o seis metros de profundidad. Tal objeto presenta un bellísimo color azul cuando se le observa por el tubo. El mismo objeto hubiérase mostrado amarillo si su color se hubiera debido a la luz reflejada por las pequeñas partículas en suspensión en el agua."

"El doctor P. A. Morrow ha empleado injertos constituidos no sólo por el grueso completo de la dermis, sino también por tejido subcutáneo. A ello se ha visto obligado en el caso de un paciente que se había vuelto algo hipocondríaco por culpa de una cicatriz en el cuero cabelludo, que en los últimos años iba quedando al aire con la pérdida de pelo. Primero extrajo injertos del otro lado del propio cuero cabelludo del paciente, valiéndose de un sacabocados cutáneo, e inmediatamente los trasplantó a los orificios del mismo tamaño que había abierto con el mismo instrumento en el tejido de la cicatriz. Para su satisfacción, la unión quedó perfecta al cabo de una semana."

"Joseph Korner, propietario de una fundición en Olmutz ha ideado una versión peculiar de bicicleta acuática. El tripulante puede usar los remos, que se muestran descansando en las horquillas, para hacer salir la máquina de un banco de arena sin necesidad de desmontar. En un ensayo, la máquina cubrió en cuatro minutos una distancia de un cuarto de milla a contracorriente, y en dos minutos y medio a favor de corriente."



Energía para el planeta Tierra

En este número monográfico se pasa revista a las necesidades mundiales de energía y nuestra capacidad para satisfacerlas sin destruir el planeta en que vivimos. Si se dan los pasos correctos, el futuro puede estar asegurado

Ged R. Davis

Cuatrocientos mil años antes de Cristo se encendió el fuego en las cuevas del Hombre de Pekín. Reverenciado como una deidad y base de muchos mitos, el fuego ha sido un elemento esencial en las técnicas sobre las que están fundadas las sociedades civilizadas. Máquinas alimentadas por combustibles fósiles han reemplazado a los músculos de animales y hombres, acelerando el desarrollo de las sociedades industriales. Nuestras ciudades, industrias y redes de transporte no podrían funcionar sin el suministro regular de energía.

Mientras el número de seres humanos fue limitado y las necesidades energéticas estuvieron restringidas a la cocina y a la producción de calor, pudo explotarse la energía sin grave perjuicio para la atmósfera, la hidrosfera y la geosfera. Ahora, multiplicado por una población creciente, el uso de la energía se ha convertido en potencial fuerza destructora, localmente porque las emisiones contaminan el aire, el agua y el suelo, y globalmente porque existe la posibilidad de que su consumo intensifique el efecto de invernadero. Nos movemos en un dilema: utilizadas debidamente, las técnicas energéticas sirven de instrumento para lograr el bienestar en todo el planeta, pero la continuación de las tendencias actuales puede degradar el entorno y propiciar una existencia sórdida e incierta.

Abordar el reto que implica el suministro de energía adecuado y seguro sin hacer inhabitable nuestro planeta es el tema del que se ocupa este número especial de *Investigación y Ciencia*. La preocupación por el entorno no es nueva, pero nuestro conocimiento del planeta ha cambiado desde que podemos medir incluso pequeñas concentraciones de sustancias y calcular sus implicaciones, para los seres humanos y para la Tierra entera. Sabemos así que el aumento de la población y sus exigencias crecientes están transformando el planeta, no menos que las fuerzas geológicas ejercidas a largo plazo.

1. DEL SOL deriva casi toda la energía de la Tierra. Esa fuente es la fuerza motriz de la fotosíntesis, que convierte la energía radiante en energía química, formando las plantas y haciendo posible toda vida animal. La fotosíntesis es también responsable de la formación de combustibles fósiles. De manera más directa, el Sol proporciona energía que puede capturarse en forma de energía solar, hidroeléctrica y eólica.

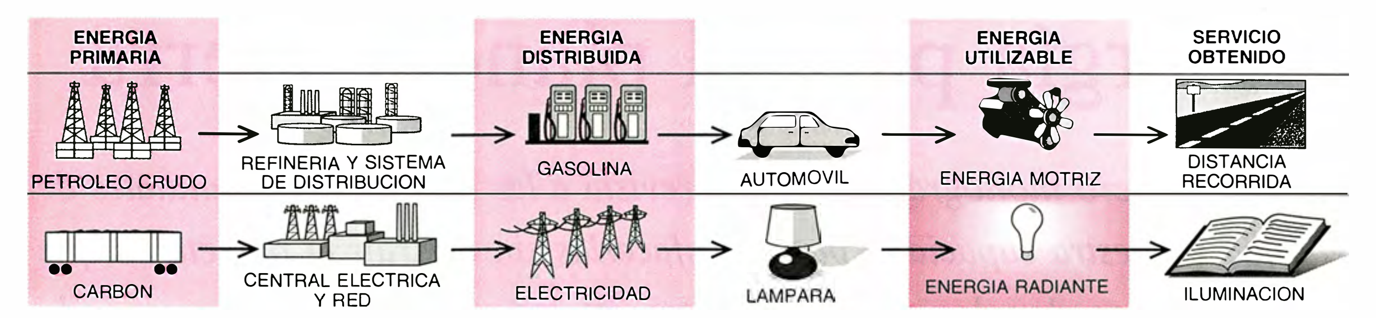
Para comprender la magnitud del desafío, conviene conocer de dónde viene la energía y los objetivos que cumple en nuestras vidas. La fuente de casi toda la energía disponible puede remontarse hasta el Sol (combustibles fósiles, biomasa, viento y radiación que nos llega) o hasta los procesos de la evolución cósmica anterior al origen del sistema solar (energía nuclear). Cantidades más pequeñas, menos significativas, derivan del movimiento lunar (energía de las mareas) y del interior de la Tierra (energía geotérmica).

Si la sociedad pudiera explotar sólo una pequeña porción de la radiación solar que llega cada año a la superficie de la Tierra, que es equivalente a 178.000 terawatt-año (alrededor de 15.000 veces el suministro energético mundial actual), nuestros problemas de energía estarían resueltos. De esa cantidad, sin embargo, el 30 por ciento se refleja de nuevo al espacio y el 50 por ciento es absorbido, convertido en calor y radiado de nuevo. El 20 por ciento restante alimenta el ciclo hidrológico. Sólo una fracción muy pequeña de la radiación solar (0,06 por ciento) alimenta el mecanismo de la fotosíntesis, del que proceden, en última instancia, la vida y los combustibles fósiles. Las energías renovables (incluidas la hidroeléctrica y la biomasa) satisfacen hoy el 18 por ciento de las necesidades mundiales y la nuclear el 4 por ciento; los combustibles fósiles cubren el 78 por ciento restante.

La gente no se preocupa de la fuente de nuestros suministros energéticos, salvo cuando se interrumpe. Pero todos prestamos atención a los servicios que la energía nos ofrece: desde exigencias básicas que se reclaman por doquier (cocinar, calentar y alumbrar) a otras más específicas de la sociedad moderna (motores, máquinas, medios de transporte y procesos industriales varios). Dado que el mundo no puede funcionar sin el abastecimiento regular de energía, un apartado significativo de la economía mundial está dedicado al suministro de tales servicios donde y cuando se requieran.

No se ilumina una habitación con sólo apretar un interruptor; éste es el último paso de una larga cadena de procesos de conversión. Hay que empezar por extraer los recursos energéticos: el gas natural y el petróleo bombeados de pozos perforados profundamente en la corteza terrestre, lo mismo que el carbón incrustado entre sedimentos terrestres. La energía primaria (digamos, petróleo crudo) se transporta a una refinería para procesarse en una amplia gama de productos; de ahí, el gasóleo se embarca rumbo a una planta energética para ser quemado (y convertirlo así de energía química en térmica). El calor producido durante la combustión alimenta una turbina que, a su vez, mueve un generador eléctrico (transformando energía térmica en mecánica y eléctrica). Por último, la electricidad viaja a través de un tendido de cables hasta que llega a los apa-

GED R. DAVIS dirige el gabinete de planificación de la Compañía Shell en Londres. Ingeniero de minas por la Universidad de Londres se licenció en economía en su célebre escuela del mismo nombre. Ha dedicado los últimos diez años al análisis del impacto ambiental y, en particular, a la adaptación de la industria al desarrollo económico viable del mundo.



2. TRANSFORMACION DE LA ENERGIA en un proceso en cadena. La energía primaria existe en forma de crudo, combustible fósil, por ejemplo, que se extrae de depósitos sedimentarios. Tras sufrir un proceso de transformación, ese recurso se convierte en energía suministrable, disponible por consiguiente para el usuario, quien, a su vez, la convierte en formas útiles y, por último, en servicios; éste constituye el fin postrero deseado.

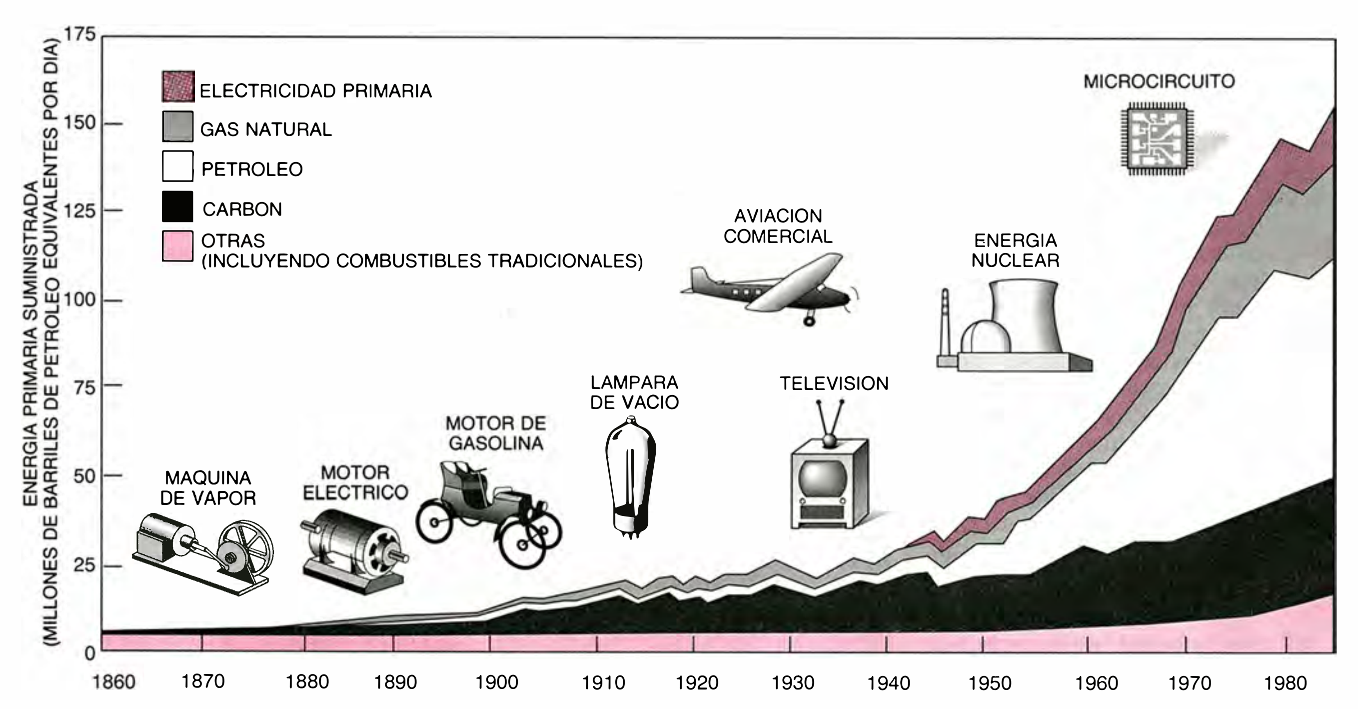
ratos de uso —la lámpara incandescente— donde se transforma en energía radiante.

La desigual distribución terrestre de los combustibles fósiles (petróleo, gas natural y carbón) exige un comercio mundial floreciente de artículos energéticos: alrededor del 44 por ciento del petróleo, el 14 por ciento del gas y el 11 por ciento del carbón son objeto de transacciones internacionales. Existen vastos sistemas de distribución al servicio de este comercio, asegurando que los recursos lleguen al usuario. El gas natural se transporta por superficie a lo largo de un millón de kilómetros de gaseoductos; el petróleo, a lo largo de 400.000 kilómetros de oleoductos, sin contar los sistemas de distribución local. Unos 2600 petroleros surcan los océanos transportando crudo; otros 65 buques suministran gas natural líquido alrededor del mundo.

Esa demanda global está consumiendo los combustibles fósiles a un ritmo 100.000 veces más rápido del que constituye su velocidad de formación. La contribución del carbón al suministro mundial de energía alcanzó su punto máximo hace tiempo: en 1920 suponía más del 70 por ciento del combustible utilizado, pero hoy satisface sólo el 26 por ciento del requerimiento global. La del petróleo se produjo en los años setenta con poco más del 40 por ciento (actualmente es el 38 por ciento). Se espera que aumente la parte correspondiente al gas natural (cifrada hoy en el 19 por ciento). Aunque las reservas de combustible fósil se estiman en unos 10 billones de barriles de petróleo —suficiente para durar otros 170 años al ritmo actual de consumo—, el suministro acabará por agotarse y, si todo el que queda se quema, se cernirá una grave amenaza sobre el entorno.

¿Cómo reconciliar nuestra creciente demanda de recursos energéticos, que son finitos, con un ecosistema global viable? No hay solución, por ahora. Los problemas que conciernen al ambiente, así el cambio climático, están rodeados por la incertidumbre; la misma diversidad de puntos de vista acerca de las relaciones entre crecimiento económico y entorno puede conducir a políticas y proyecciones muy dispares sobre el suministro y uso de la energía.

Para simplificar las cuestiones, me gustaría explorar dos vías posibles de encaminarse hacia el futuro. La vía del "consenso", ampliamente de-



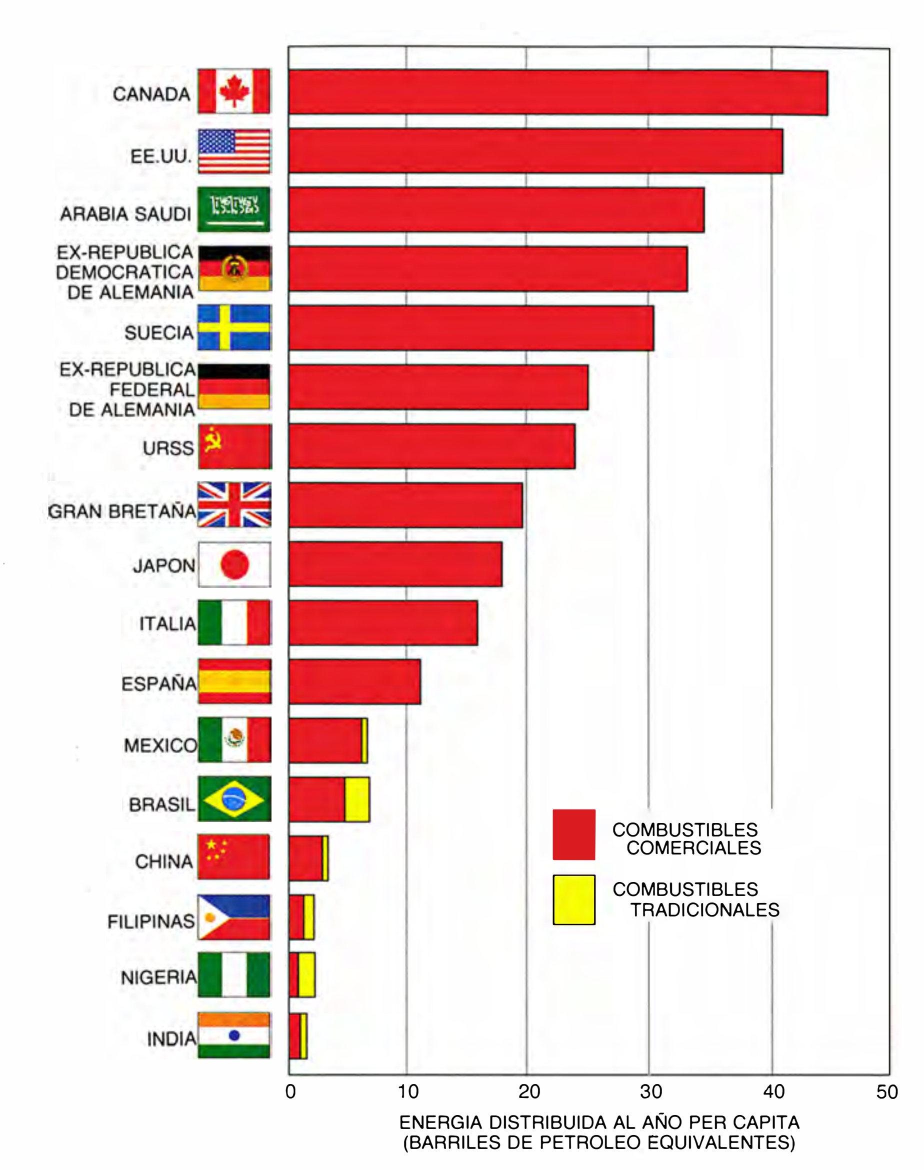
3. TASA DE UTILIZACION DE ENERGIA PRIMARIA y contribución relativa de diferentes fuentes. Refleja la evolución de la técnica, así como el crecimiento de la población humana. El rápido aumento del petróleo después de la segunda guerra mundial, por ejemplo, es indicativo del aumento en el transporte y la industria. De modo similar, el crecimiento del consumo eléctrico a finales de los años sesenta corre paralelo a la inclinación de la economía hacia los servicios. Aunque los combustibles fósiles dominan todavía el suministro de energía primaria, el carbón alcanzó su máximo alrededor de 1920, cuando proporcionó más del 70 por ciento del combustible consumido; el petróleo llegó a su máximo a principios de los setenta, con un poco más de un 40 por ciento. Se espera que el gas natural, menos contaminante, aumente su contribución al consumo global.

fendida, se basa en una continuación de las tendencias actuales, mientras que el enfoque del "mundo viable" presupone que los temas medioambientales, en su escala global, entrarán con fuerza en los foros internacionales hacia mediados de los noventa. Bajo ambas ópticas yace el supuesto de que hacia el año 2010 la población mundial alcanzará los 7000 millones y se habrá duplicado el producto mundial bruto.

Según el punto de vista del consenso, no se espera que cambien mucho los hábitos de consumo y las formas de vida; el precio del crudo subirá gradualmente, aunque su trayectoria puede ser cambiante. Se espera que el consumo mundial de energía se incremente entre el 50 y el 60 por ciento para el año 2010, y que la relación global entre los combustibles permanezca más o menos igual a la actual. Por tanto, las emisiones globales de dióxido de carbono (CO_2) aumentarán también en un 50 o 60 por ciento. Está implícita en el enfoque del consenso la hipótesis de la viabilidad de la trayectoria actual y que el cambio de clima no reviste mayor trascendencia o es algo a lo que los humanos pueden adaptarse.

Son muchas las incógnitas acerca del calentamiento global, pero si los estudios confirman una relación entre las emisiones de CO_2 y el cambio climático, mantener la propuesta de desarrollo abogada por el enfoque del consenso tendría un alto coste. A propósito de esto, un informe reciente publicado por el Grupo Intergubernamental sobre el Cambio Climático llega a la conclusión de que "continuar como hasta ahora" puede llevar a un peligroso incremento de la temperatura media durante el próximo siglo, de 0,3 grados por década, con un impacto serio en las sociedades humanas y en los sistemas naturales. La experiencia nos dice que la política no debe limitarse a adaptarse a las circunstancias, sino que tiene que anticiparse a ellas. En esa idea se funda el enfoque del mundo equilibrado o viable.

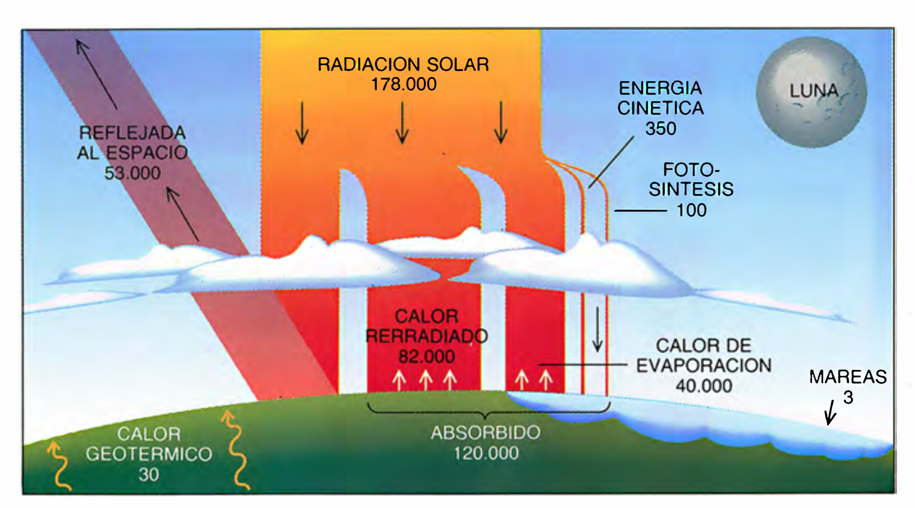
Ahora bien, el sistema que permite a la sociedad producir energía no se presta a una respuesta flexible y rápida. Una infraestructura rígida (las centrales eléctricas pueden durar de 20 a 40 años), plazos muy largos (en muchos programas, desde el proyecto hasta la puesta en operación, pueden pasar una docena de años o más) y apreciaciones públicas firmemente establecidas (de costes, aceptabilidad medioambiental y necesidad) determinan que el sistema se mueva por inercia. Los proyectos hoy en desarrollo, pergeñados años atrás, son los que dominarán el panorama en los años venideros. A pesar de todo, hay motivos para pensar en la posibilidad del cambio.



4. EXISTEN GRANDES DISPARIDADES en el consumo energético *per capita*. Los EE.UU. y Canadá tienen las tasas más altas: el ciudadano medio en esos países utilizaba el equivalente a 40 barriles de petróleo en 1988. En cambio, el nigeriano medio gastaba sólo dos barriles, sobre todo en forma de combustibles tradicionales. Las tasas bastante altas en la Unión Soviética y lo que fue hasta octubre Alemania socialista reflejan el derroche, en la distribución y uso de la energía, en esos países.

La propia historia se define por la rápida evolución tecnológica. Mientras que el planeta alojó sólo a unos pocos cientos de millones de seres humanos, al principio de la revolución industrial, ahora cobija a unos 5000 millones de personas que ocupan mil millones de hogares, conducen 500 millones de vehículos de motor e invierten grandes esfuerzos para producir una inmensa variedad de bienes industriales que aumentan su confort. La energía total suministrada (la cantidad que llega al usuario; por ejemplo, la electricidad necesaria para encender una bombilla o el gas natural preciso para calentar una casa) ha aumentado desde el equivalente a unos 8 millones de barriles de petróleo al día en 1860 a 123 millones de barriles diarios en 1985. Excluyendo de los cálculos la leña para quemar, la energía suministrada (en su mayor parte carbón, petróleo, gas natural y electricidad) ha aumentado casi 60 veces. De hecho, los servicios relacionados con la energía crecen a un ritmo mucho más rápido que la energía suministrada, gracias sobre todo al mayor aprovechamiento en el uso final.

La demanda de energía se elevará con el salto económico contemplado para los países en vías de desarrollo, donde tendrá lugar el 90 por ciento del crecimiento mundial de la población. En las economías atrasadas, la persona media consume una cantidad de combustible tradicional (leña y otros desechos orgánicos, la mayoría



5. RADIACION SOLAR que llega a la Tierra cada año. Es igual a 178.000 terawatt, alrededor de 15.000 veces el actual suministro mundial de energía. De esta cantidad, el 30 por ciento se refleja inmediatamente hacia el espacio; otro 50 por ciento se absorbe, se convierte en calor y se vuelve a radiar. El 20 por ciento restante origina los vientos, alimenta el ciclo del agua y abastece la fotosíntesis. Algo de energía, en forma de calor geotérmico, puede obtenerse del interior de la Tierra; una pequeña cantidad (generada por la atracción gravitatoria de la Luna) existe como energía de mareas. Aunque no se han mostrado en la figura, las estimaciones para el potencial de los recursos renovables (biomasa, energía solar, hidroeléctrica, eólica y geotérmica) sugieren que pueden incrementarse, de los niveles actuales inferiores a un terawatt-año al año, a 10 o tal vez 15 terawatt-año anuales. El incremento de las energías renovables dependerá de su coste y del deterioro medioambiental.

de los cuales son recogidos más que comprados) equivalente a uno o dos barriles de petróleo al año. A medida que los países se industrializan y urbanizan, los combustibles comerciales desplazan a los tradicionales. En un país en vías de desarrollo se utiliza, por persona y anualmente, el equivalente a uno o dos barriles de petróleo de combustible comercial (que se compran en el mercado libre). Ese valor se convierte en 10 a 30 barriles en Europa y Japón y en más de 40 en EE.UU.

No obstante depender de combustibles tradicionales, las economías pobres tienen una alta intensidad energética (energía utilizada por unidad de riqueza) porque necesitan cualquier forma de energía disponible —normalmente leña, residuos agrícolas o estiércol para cocinar y calentar las casas— a pesar del escaso rendimiento que sacan a la quema de tales combustibles. De todo ello se infiere una pauta: a medida que los países se industrializan, aumenta la cantidad de combustible comercial utilizada por unidad de riqueza y disminuye de manera global la intensidad energética. Puesto que el consumo de energía comercial podría elevarse con la celeridad de la riqueza durante períodos largos, el crecimiento de la demanda energética podría alcanzar un 4 o 5 por ciento al año en los países en vías de desarrollo.

Hoy como ayer, la solución a los problemas energéticos depende de las técnicas disponibles y el ritmo de su progreso. Desde mediados del siglo XIX, las fuentes de energía han cambiado de la leña, el viento y el agua al carbón y, más recientemente, al petróleo y al gas natural. La interrelación entre energía y técnica, puesta de manifiesto por tres fases de la revolución industrial, da cuenta del cambio. Durante la primera fase, que se inicia a principios del siglo XVIII, dominaban la minería del carbón, la fundición y forja del hierro y el transporte ferroviario y marítimo de vapor. Los componentes del sistema guardaban una estrecha interconexión: el motor de vapor, desarrollado originalmente por Thomas Newcomen para los sistemas de extracción y drenaje en las minas, fue adaptado más tarde por James Watt para suministrar energía para el transporte y la fundición de hierro. Los altos hornos, a su vez, aportaron materiales para fabricar motores de vapor, locomotoras, raíles, barcos y equipos de minería. La creación de una infraestructura de transporte y máquinas para las fábricas posibilitó el rápido progreso de la industrialización.

Hacia finales del siglo XIX, el mundo asistió a otra profunda transformación: ahora, por la energía eléctrica, los motores de combustión interna, los automóviles, los aviones y las industrias químicas y metalúrgicas. El petróleo surgió como combustible y base para la industria petroquímica. En la última década del siglo XX, la sociedad se ha embarcado en una tercera fase de la revolución industrial, caracterizada por un cambio hacia los ordenadores, los nuevos materiales, la optoelectrónica y la biotecnología.

Se desconoce la incidencia de la tercera fase en los modelos globales de consumo de energía. La aplicación de la tecnología depende de los objetivos que la sociedad se plantee y, especialmente, de su adopción del punto de vista del desarrollo viable.

No será fácil alcanzar un consenso global. Las políticas energéticas varían bastante de un país a otro. Mientras unos gobiernos gravan con impuestos, otros subvencionan el suministro de energía. Para unos, la energía constituye una fuente de enriquecimiento; para otros, una oportunidad de ayudar a los más pobres. También deben afrontarse las cuestiones relativas a la seguridad del suministro y el impacto del cambio del precio de la energía sobre la inflación y balanza comercial de un país.

Los impuestos sobre la producción de petróleo son, por ejemplo, la fuente fundamental de ingresos para los mayores exportadores de petróleo, como Venezuela y Arabia Saudita. En los países de la Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo (OCDE) son, sobre todo, los usuarios de la energía quienes pagan impuestos. Tales políticas no son en absoluto fijas; algunas han sufrido cambios radicales en un intervalo de tiempo más bien corto. En los países importadores de energía, la preocupación por la seguridad en el suministro, ausente hasta la primera crisis del petróleo en 1973, dominó el final de los años setenta y principios del decenio siguiente. A finales de los ochenta, cuando apareció la superproducción, la preocupación se desplazó hacia el otro lado del mercado: los países exportadores empezaron a buscar compradores seguros para su petróleo. (No entramos en la situación provocada por la crisis del golfo Pérsico en agosto de 1990.)

En varios países, el sector energético está en manos de compañías estatales; en otros, como Gran Bretaña, la política económica ha apostado por las virtudes de la eficacia y la competitividad e incentivado, pues, la privatización. Muchos gobiernos regulan el impacto sobre el entorno de todos los eslabones de la cadena energética —desde la producción hasta los residuos y el desmantelamiento de una central. A modo de común denominador, los gobiernos se esfuerzan en proporcionar a su población un suministro adecuado, seguro, económico y equitativo.

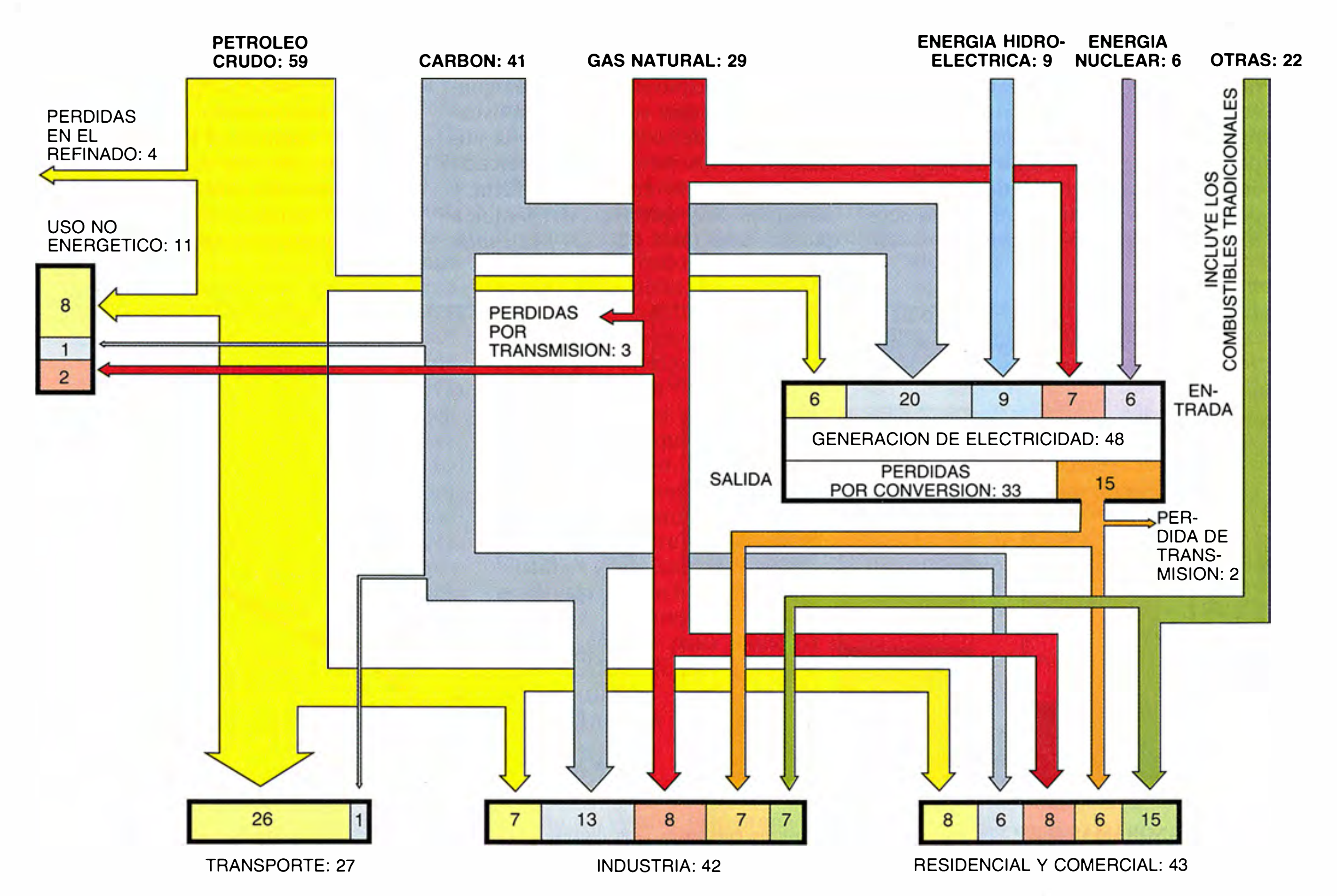
La operatividad de estas políticas vendrá condicionada por la evolución de la tecnología, aplicada ya sea al diseño, al funcionamiento o al control

de los sistemas energéticos. Pero no es fácil adivinar con qué ritmo se irán incorporando las nuevas técnicas en el mercado; en muchos casos no hay forma de prever la naturaleza interdisciplinaria de las interacciones tecnológicas. Por ejemplo, las interrelaciones imprevistas entre nuevos materiales, técnicas de ingeniería, dispositivos microelectrónicos y tecnologías de combustión han aumentado mucho la eficacia potencial del consumo de combustible de los automóviles, pero cabe mejorarla.

De cómo sacar un ingente potencial de ahorro a una técnica rentable se ocupan aquí algunos artículos. Arnold P. Fickett, Clark W. Gellings y Amory B. Lovins sugieren que las medidas de eficacia podrían reducir el consumo de electricidad en Estados Unidos del 30 al 75 por ciento. Rick Bevington y Arthur H. Rosenfeld repasan varias estrategias para reducir el uso de combustible en edificios. Ahorros similares, afirman Marc H. Ross y Daniel Steinmeyer, pueden lograrse en el sector industrial, que gasta el 40 por ciento de la energía utilizada en el mundo desarrollado.

Entre las nuevas técnicas, muy rentables desde el punto de vista energético, citemos las lámparas fluorescentes compactas y otros dispositivos de iluminación, que pueden reducir en un 90 por ciento la cantidad de energía requerida para iluminar. Hay dispositivos que consumen sólo del 10 al 20 por ciento de la electricidad que requieren los convencionales. Una nueva generación de controles automatizados permiten optimizar los sistemas de alumbrado, calefacción, ventilación y aire acondicionado. En la industria, los mecanismos de velocidad ajustable y los motores de alto rendimiento prometen ahorros significativos, igual que los avances en el diseño de procesos integrados, control tecnológico y reciclado. En el sector del transporte, están ganando interés los vehículos capaces de consumir 4 litros de combustible, o menos, por 100 kilómetros, sin olvidar los que funcionan con gas natural comprimido, hidrógeno y electricidad.

Están llamados a adquirir especial importancia los progresos en la prospección y explotación de petróleo y gas. Las técnicas de sísmica tridimensional y perforación horizontal, por ejemplo, facilitarán el acceso a tales recursos sin elevar demasiado su coste. Los rápidos avances tecnológicos en el sector de las energías alternativas, descritos aquí por Carl J. Weinberg y Robert H. Williams, abren nuevas posibilidades. En el laboratorio, el rendimiento de las células solares fotovoltaicas centuplica el obtenido por las creadas en los años setenta, y se espera que mejoren aún más; las turbinas eólicas de velocidad variable son de coste competitivo en algunos mercados. Nuevos procesos para producir combustibles líquidos a partir de la biomasa sugieren opciones alternativas al petróleo, viables aunque a una escala menor. Wolf Häfele prevé que la amenaza de un calentamiento global avivará la demanda de energía nuclear, que puede alcanzarse con reactores de seguridad inherente, operados bajo la supervisión de una autoridad internacional.



6. FLUJO MUNDIAL DE ENERGIA en 1985. Nos muestra la versatilidad de los combustibles fósiles. El petróleo crudo (*amarillo*) debe procesarse en refinerías, donde se convierte en gasolina, gasoil y queroseno. El petróleo y el gas natural (*rojo*) se destina sobre todo a la industria, el comercio y la vivienda; sólo un pequeño porcentaje de cada uno genera electricidad. La mayoría del carbón mundial (*azul celeste*) alimenta industrias o genera electricidad. La hidroeléctrica, la nuclear y otras fuentes (biomasa, energía solar y eólica) alcanzan el 22 % del suministro de energía primaria.

La técnica auspicia el tránsito de las grandes centrales energéticas hacia otras menores y más repartidas. El avance en las comunicaciones por medios electrónicos, junto con las técnicas de control y cálculo ha posibilitado el seguimiento y regulación de redes complejas por control remoto. Con la llegada de nuevas turbinas de gas, motores pequeños, células solares y otros ingenios, están disminuyendo las economías de escala, durante mucho tiempo característica de la generación de electricidad. Además de resultar más rentable la descentralización, nos explican Amulya K. N. Reddy y José Goldemberg, ofrece a los países más pobres una catapulta para su despegue económico.

A largo plazo, esa gavilla de adelantos técnicos habrán de rebajar los costes totales asociados con la limitación de las emisiones de dióxido de carbono de los combustibles fósiles. En general, el tiempo de respuesta —desde su ideación hasta la producción comercial pasando por el prototipo— está acortándose, tendencia que parece que va a continuar. En este respecto, los fabricantes japoneses prevén que, hacia 1993, los coches se diseñarán y desarrollarán en la mitad de tiempo y a una cuarta parte del coste de los prototipos actuales. En su previsión destacan el papel de la competitividad global como motor del cambio tecnológico. Dado que se esperan avances similares en otros sectores de la industria, podríamos sorprendernos de la velocidad de la respuesta a las nuevas ideas.

La tecnología, sin embargo, acelerará el paso de la sociedad hacia el desarrollo viable si los políticos se ponen de acuerdo en las líneas generales de actuación. Si ha de presentarse un cambio significativo en la estructura del suministro y uso de la energía en los próximos 20 años, las nuevas políticas habrán de funcionar ya a mediados de los años noventa, lo que significa que los miembros de la OCDE tendrán que estar de acuerdo sobre un protocolo para compensar la posibilidad de un cambio climático.

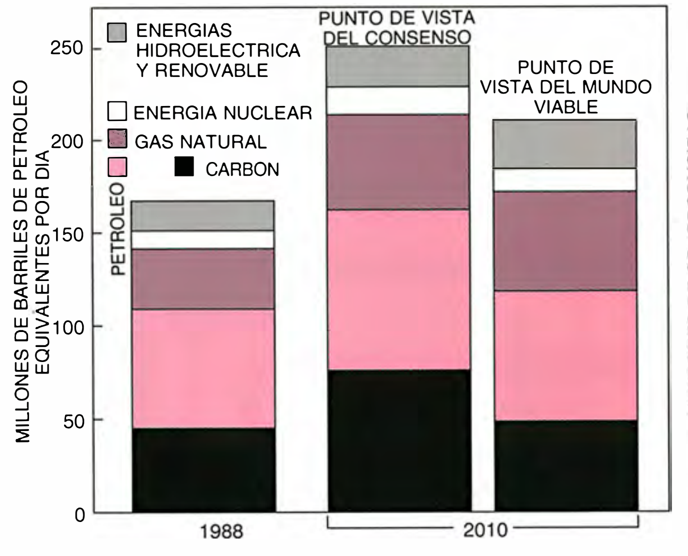
A grandes trazos, estas son las principales opciones: eliminar los halocarburos (que minan el ozono estratosférico y contribuyen al calentamiento global), iniciar programas de reforestación para rebajar la concentración del carbono y reducir las emisiones de CO_2 de los combustibles fósiles. Estos objetivos pueden alcanzarse sacándole mayor partido a la transformación y uso de los combustibles fósiles e introduciendo combustibles alternativos, menos ricos en carbono y más en hidrógeno.

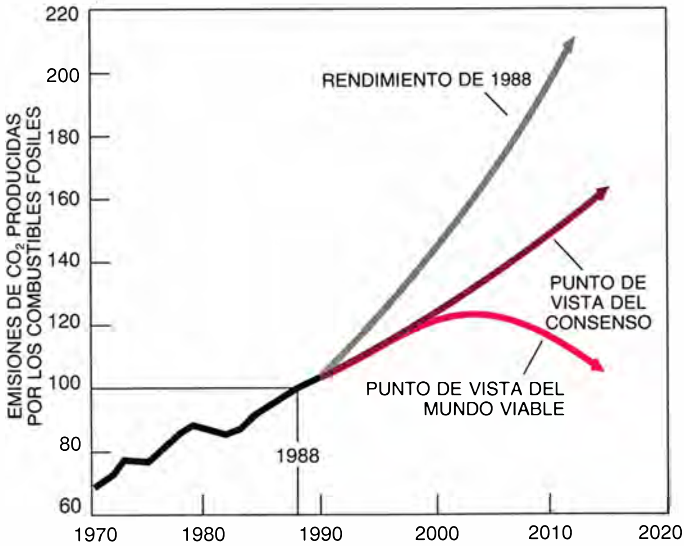
Aunque las medidas diferirán de un país a otro, cabe esperar que ciertas políticas gocen de respaldo general, como el principio de que el que contamina paga, que reclama a los usuarios el pago del coste total de la utilización de los recursos y al mercado que actúe como árbitro de oferta y demanda. Hay que recordar también que las emisiones de CO_2 *per capita* en las naciones de la OCDE decuplican las producidas por el Tercer Mundo; por tanto, es necesario un acuerdo equitativo sobre las reducciones.

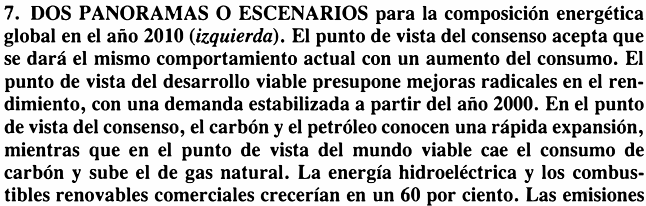
El papel de los países en vías de desarrollo, Europa oriental, la Unión Soviética y China, será decisivo en la respuesta energética global. Para muchos de ellos, la reforma económica constituye el punto de partida inevitable. Y a su cumplimiento ayudará la universalización creciente que facilita la rápida difusión de la técnica.

Está todavía por determinar el objetivo a cumplir por un programa eficaz. Un estudio reciente, elaborado para la conferencia ministerial sobre contaminación atmosférica y cambio climático celebrada en la ciudad holandesa de Noordwijk, en 1989, estimaba los costes de capital en torno al 0,8 por ciento del producto interior bruto (PIB) para un programa preventivo cuyo objetivo fuera la eliminación absoluta de halocarburos, la gestión de la repoblación forestal y la conservación de la energía. Si se cumpliera en su integridad, tal programa reduciría las emisiones previstas de gases de invernadero en los países de la OCDE en un 30 por ciento hacia el año 2005. Pero un compromiso total para el equilibrio obligaría a más. Los gastos medioambientales podrían precisar incrementos del orden del 1 o el 2 por ciento del PIB.

Cambios de esa magnitud pueden acometerse, durante una o dos décadas, con escasos trastornos económicos. Se han producido ya cambios si-



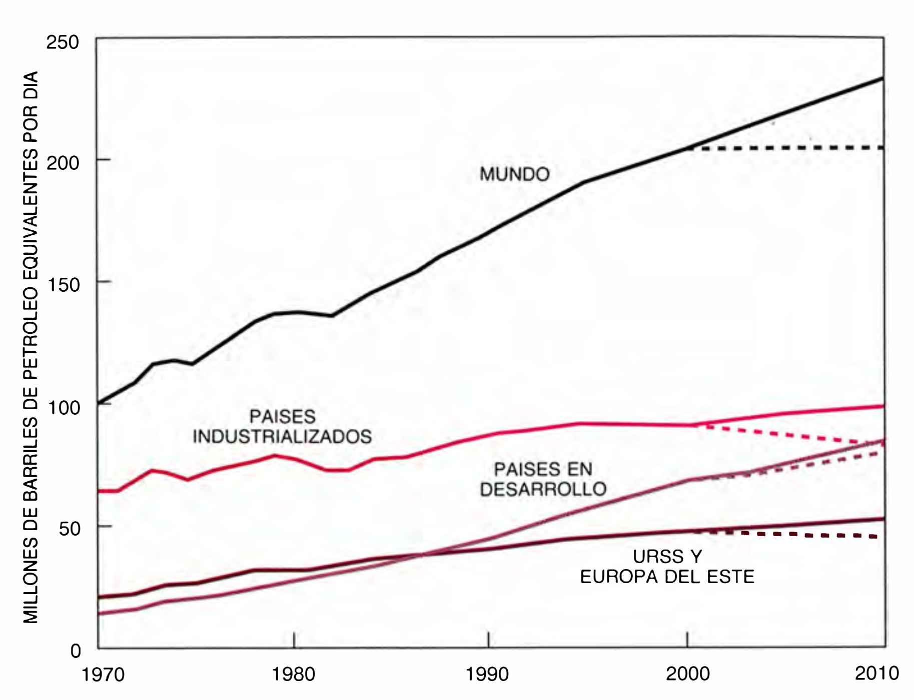



7. DOS PANORAMAS O ESCENARIOS para la composición energética global en el año 2010 (*izquierda*). El punto de vista del consenso acepta que se dará el mismo comportamiento actual con un aumento del consumo. El punto de vista del desarrollo viable presupone mejoras radicales en el rendimiento, con una demanda estabilizada a partir del año 2000. En el punto de vista del consenso, el carbón y el petróleo conocen una rápida expansión, mientras que en el punto de vista del mundo viable cae el consumo de carbón y sube el de gas natural. La energía hidroeléctrica y los combustibles renovables comerciales crecerían en un 60 por ciento. Las emisiones de dióxido de carbono se incrementarán hasta el año 2000 (*derecha*), pero su producción dependerá entonces de las medidas políticas tomadas en los años noventa. Si el consumo de energía siguiera el ritmo del crecimiento económico, las emisiones de dióxido de carbono se duplicarán hacia el año 2010. Con un mayor aprovechamiento de la energía, las emisiones, en el marco de la hipótesis del consenso, aumentarían con la mitad de velocidad. Por contra, en el marco del punto de vista viable, las emisiones de dióxido de carbono alcanzarán su máximo después del 2000, aunque serán todavía un 15 por ciento más altas en el año 2010 que su valor actual.

milares, e incluso mayores. Entre 1965 y 1985, por ejemplo, la suma gastada por los consumidores estadounidenses bajó un 6 por ciento en alimentación, mientras que el apartado de salud creció de un 6 a un 11 por ciento a lo largo del mismo período. Al propio tiempo, los gastos energéticos en los países de la OCDE cayeron de un 12 por ciento del PIB a sólo un 8 por ciento en 1988. Aunque no hay suficientes datos sobre los fondos actuales para el medio ambiente, la media debe de estar en un 2 o un 3 por ciento del PIB en la mayoría de los países de la OCDE. Elevar ese guarismo a un 4 o 5 por ciento es factible (especialmente si bajan los presupuestos de defensa de muchos países).

En un mundo que opta por el desarrollo viable y establece incentivos para promover el cambio, podemos esperar el consiguiente resultado en el sector energético. Partiendo de que el aumento de la población y el crecimiento económico sean los mismos que en el punto de vista del consenso, y que los protocolos nacionales estén en marcha a mediados de los noventa, el suministro primario mundial de energía puede estabilizarse en el equivalente a unos 205 millones de barriles de petróleo diarios para el año 2000. Esto, por sí solo, constituiría ya una proeza heroica. Pero, incluso con ese programa, las emisiones de CO_2 de los combustibles fósiles podrían crecer un cuarto para el año 2000. A pesar de una sustitución importante de carbón por gas natural (unida a una mayor contribución de combustibles renovables y de un mayor rendimiento), las emisiones de CO_2 en el 2010 seguirán superando las de hoy.

En un mundo de desarrollo viable, el equilibrio de las nuevas iniciativas se desplazaría del productor al cliente, del suministro de energía a los servicios que la explotan y de la cantidad a la calidad de la energía. Un importante paso al frente sería el de adoptar opciones que integraran los servicios energéticos necesarios en planes regionales y municipales. Como señalan Bleviss y Walzer, las normativas metropolitanas pueden disuadir del transporte local en coche y nuevos sistemas de control del tráfico pueden reducir la contaminación atmosférica urbana. Bevington y Rosenfeld ponen de relieve la importancia de plantar árboles que den sombra y de pintar los edificios en colores claros y reflectantes para reducir el consumo energético en las urbes. Cambios en la infraestructura de transporte existente, como la introducción de trenes de levitación magnética en Europa, instan la necesidad de replantearse nuestra red viaria, ferroviaria y aérea.



8. VARIACION ESPERADA de la demanda de energía primaria. El grueso del incremento ocurrirá en el mundo en vías de desarrollo, donde las tasas de crecimiento demográfico son más altas y se están industrializando y urbanizando. Por contra, se espera que la demanda permanezca estable o caiga en los países desarrollados, donde las tasas de crecimiento de la población son bajas. Puede estabilizarse o caer en el este de Europa y en la URSS, a tenor del éxito que tengan las reformas económicas. Todo depende de que triunfen las políticas del consenso o del desarrollo viable.

La respuesta mancomunada a la opción de un mundo de desarrollo viable puede incluir la creación de un nuevo tipo de compañías del sector energético, capaz de ofrecer una amplia gama de técnicas de vanguardia a los usuarios. Tales compañías desarrollarían actividades muy dispares. En unas áreas metropolitanas podría haber un mercado para el transporte público. En otras, la prohibición de motores de combustión interna podría crear servicios para guardar y recargar las baterías de coches eléctricos. A medida que el ingenio se oriente cada vez más a los servicios, es muy posible que éstos conozcan un mayor desarrollo. La necesidad de rápidos desplazamientos incentivará también las alianzas de investigación y desarrollo entre compañías de combustibles y fabricantes de equipos. De esa colaboración habrán de salir combustibles, motores y procesos inimaginados. Algún paso modesto se ha dado ya. En EE.UU. ciertas compañías petroleras producen combustibles alternativos y gasolinas de nuevas fórmulas.

Para muchos, la transición hacia un mundo viable está preñada de incertidumbres y dilemas. Se trata de algo quizá natural, pues vivimos entre dos tendencias que se expresan por los dos puntos de vista: el del consenso y el del desarrollo viable. Para otros, la situación está mejor definida. Tal y como se afirma claramente en "La gestión del planeta Tierra", el número monográfico de *Investigación y Ciencia* de noviembre de 1989, la historia del mundo viable es la historia de nuestro tiempo, un tiempo en que los seres humanos necesitan reafirmar su papel de servidores, que no explotadores, de su planeta.

A medida que vamos profundizando en la relación del hombre con el planeta, descubrimos que la energía no es tanto un bien a explotar del planeta Tierra, cuanto un bien para el planeta Tierra, y en esa óptica hemos de laborar. Seguiremos dependiendo de la energía, pero habremos de considerarla en el seno de un planeta ecológicamente equilibrado. Esto significa que el hombre deberá aplicar toda su inventiva para desarrollar nuevas técnicas que garanticen, a largo plazo, la calidad de su entorno.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

EXPERT SEMINAR ON ENERGY TECHNOLOGIES FOR REDUCING EMISSIONS OF GREENHOUSE GASES. Organization for Economic Co-operation and Development and International Energy Agency, París, 12 al 14 de abril de 1989.

ENERGY FOR TOMORROW. Fourteenth Congress of the World Energy Conference, Montreal, 17 al 21 de septiembre de 1989.

TECHNOLOGY AND ENVIRONMENT. Dirigido por Jesse Ausubel y Hedy E. Sladovich. National Academy Press, 1989.



Uso rentable de la electricidad

La técnica actual, que ofrece la posibilidad de atender las necesidades futuras de energía en todo el mundo, permite reducir al mínimo el impacto ambiental que supone su producción. El ahorro energético nos beneficia a todos

Arnold P. Fickett, Clark W. Gellings y Amory B. Lovins

La electricidad es un elemento fundamental para la calidad de la vida moderna. Esta forma de energía, valiosa, versátil y fácilmente controlable, realiza, y realiza bien, tareas muy dispares. En poco más de 100 años, la electricidad ha transformado la vida de la mayoría de los habitantes del mundo. El alumbrado, la refrigeración, los motores eléctricos, las técnicas médicas, los ordenadores y los medios de comunicación de masas constituyen sólo algunos de los avances que la electricidad auspicia para un número cada vez mayor de personas de todo el mundo.

Muchos analistas creen que en los próximos 10 años se podrían producir restricciones en el suministro eléctrico de algunas zonas de los Estados Unidos, quizás ya en 1993. Dada la importancia de la electricidad para todos los sectores de la economía, las restricciones arrastrarían graves consecuencias. Pero financiar la construcción de nuevas centrales eléctricas provocaría un aumento muy notable en el coste de la electricidad. Este coste se cifra hoy en unos 170.000 millones de dólares anuales: una central eléctrica de gran tamaño (con una potencia del orden de 1000 millones de watt) cuesta más de 1000 millones de dólares y su construcción y funcionamiento deben satisfacer múltiples trabas administrativas y medioambientales. Existe, en consecuencia, una presión creciente para que los servicios correspondientes posean la capacidad de producción de la energía necesaria, para que se reduzca la demanda de electricidad o para ambas cosas a la vez.

Un kilowatt-hora de electricidad puede mantener encendida una bombilla de 100 watt durante 10 horas, elevar un peso de una tonelada hasta una altura de 300 metros sobre el suelo, fundir el aluminio suficiente para fabricar seis botes de refrescos o calentar el agua suficiente para una ducha durante algunos minutos. Con el fin de ahorrar dinero y reducir los aspectos negativos del impacto ambiental, ¿podemos obtener más trabajo, más luz, más aluminio o más agua caliente con el mismo kilowatt-hora?

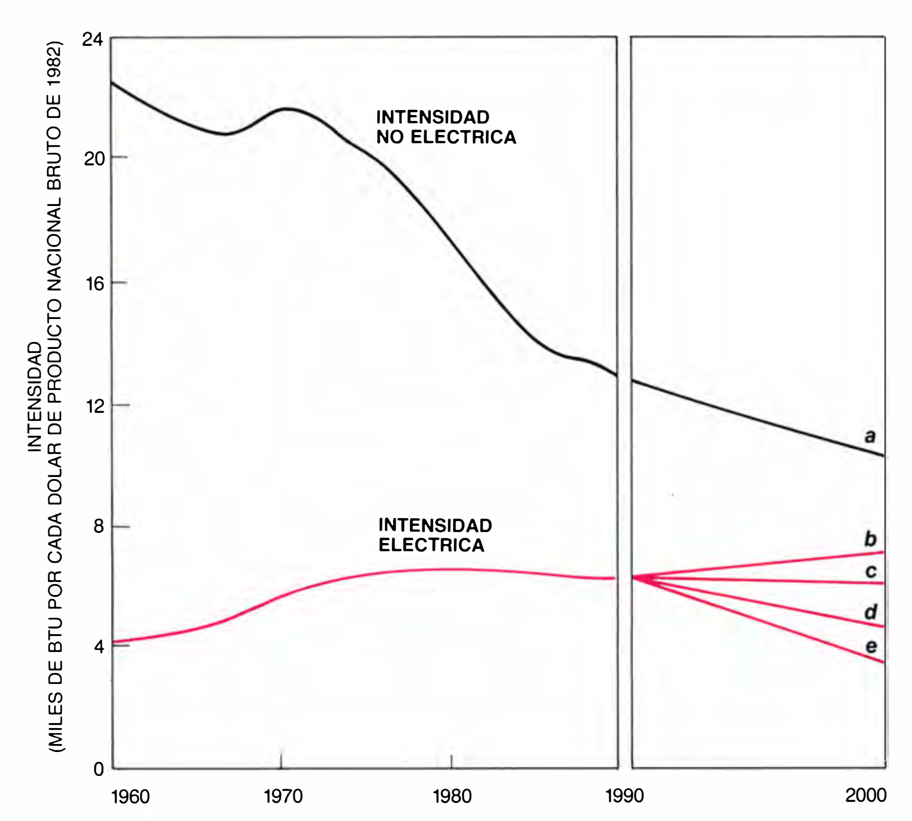
La pregunta admite una respuesta afirmativa. Sin embargo, las estimaciones de la cuantía varían entre el 30 y 75 por ciento. También se discute la celeridad con que podemos mejorar el rendimiento y el coste que ello representa.

Desde el embargo del petróleo en 1973, la intensidad energética (es decir, la cantidad de energía necesaria para producir un dólar de producto nacional bruto) ha disminuido en un 28%. (Hablamos, por supuesto, sin considerar la crisis del golfo Pérsico de agosto de 1990.) La evitación de pérdidas de vapor, el uso de máquinas bien ajustadas, el recubrimiento de las conducciones con aislantes o la fabricación de automóviles con bajo consumo de gasolina han ayudado a extraer más trabajo por cada unidad de combustible. Las aplicaciones de la electricidad han contribuido también de forma importante a aumentar la productividad y a desarrollar una economía que se funda cada vez más en la información. La electricidad representa una fracción creciente de la demanda de energía y su relación con el producto nacional bruto se ha mantenido casi estacionaria a lo largo de los últimos años. Sin embargo, no está nada claro que el consumo de electricidad y el crecimiento económico deban continuar aumentando de consuno en el futuro. Contamos con técnicas para aprovechar mejor la electricidad y, al mismo tiempo, mejorar los servicios. El domeñar ese potencial podría liberar a la sociedad de las amenazas económicas y ambientales que se ciernen sobre ella y permitiría disponer de servicios eléctricos que se consideran vitales para el desarrollo [*véase la figura 2*].

Las tendencias históricas empiezan a cambiar. California redujo su intensidad eléctrica en un 18 por ciento de 1977 a 1986 y se espera que así continúe en el futuro. Pero en algunas grandes industrias, pensemos en el sector automovilístico, siderúrgico y papelero, el consumo de electricidad por tonelada de producto aumenta, a diferencia de lo que sucede en Japón, donde dicho consumo está disminuyendo; esta diferencia se debe a que las compañías norteamericanas están todavía adoptando las nuevas "electrotecnologías" de ahorro energético que ya se utilizan de manera rutinaria en Japón. Dado que las compañías niponas están mejorando su rendimiento a una velocidad mucho mayor que las estadounidenses, la distancia entre el rendimiento de unas y otras es cada

1. TENDIDO ELECTRICO para suministrar fuerza, alumbrado y demás servicios en una ciudad californiana. Si se incorporasen las técnicas ya disponibles se ahorrarían fluido y dinero.

ARNOLD P. FICKETT, CLARK W. GELLINGS y AMORY B. LOVINS trabajan en el sector eléctrico. Fickett es vicepresidente de la división de sistemas para el usuario del Instituto de Investigación de la Energía Eléctrica (IIEE). Se graduó en electroquímica por la Universidad del Noroeste. Fickett tiene más de treinta años de experiencia en la investigación, ingeniería y aplicaciones de técnicas relacionadas con la energía. Gellings, que dirige la división de sistemas para el usuario del IIEE se formó en el Politécnico de Nueva Jersey. Durante más de veinte años ha trabajado en el sector de la energía, en su vertiente técnica y de gestión. Lovins es director de investigación en el Instituto de las Montañas Rocosas, un centro sin fines lucrativos dedicado a la política de recursos, que fundó con su esposa, L. Hunter Lovins, en 1982.



2. RELACION entre consumo de electricidad y economía de los Estados Unidos. Se ha mantenido bastante estable a lo largo de las tres últimas décadas, en tanto que ha disminuido la intensidad de otras formas de energía, debido en parte a una mayor demanda de electricidad. Pero el uso rentable de esa energía podría reducir la intensidad. El gráfico muestra una proyección de la intensidad no eléctrica (*a*), una proyección de la intensidad eléctrica para los niveles actuales de rendimiento (*b*), una proyección en la que se tienen en cuenta también los programas de mayor aprovechamiento del fluido propuestos por las compañías eléctricas (*c*), una estimación conservadora del potencial de eficiencia (*d*) y, por último, una estimación optimista de dicho potencial de rendimiento (*e*).

día mayor y, como consecuencia de ello, la competitividad de los japoneses resulta ser también superior.

Otros países industrializados se aprestan a mejorar sus niveles de eficiencia. Suecia ha encontrado la forma de duplicar el rendimiento eléctrico. Dinamarca se ha propuesto reducir a la mitad sus emisiones de dióxido de carbono entre 1990 y 2030. Alemania pretende que los niveles de dichas emisiones en el año 2005 sean un 75 por ciento de los producidos en 1987; estos dos últimos países dedican una gran atención al factor eficiencia.

Estos planteamientos tan alentadores ponen de manifiesto un avance muy rápido en cuatro frentes diferentes, aunque relacionados entre sí: introducción de técnicas para un mejor uso de la electricidad, nuevas formas de financiación y extensión de estas técnicas a los consumidores, ampliación y replanteamiento de las aplicaciones de los dispositivos eléctricos, así como nuevas regulaciones para incentivar el rendimiento.

La revolución tecnológica resulta espectacular. En la década de los ochenta, se creó una cantidad ingente de dispositivos más potentes y con un consumo más bajo de electricidad. El progreso parece acelerarse a medida que se producen nuevos avances en el diseño y fabricación de los materiales, la electrónica y los ordenadores. El Instituto de las Montañas Rocosas ha estimado que, en los últimos cinco años, la posibilidad de ahorro de electricidad se ha duplicado, en tanto que el coste medio que supone el ahorro de un kilowatt-hora ha disminuido aproximadamente en dos tercios. Nuestro Instituto ha encontrado también que la mayoría de las técnicas empleadas para mejorar el rendimiento tienen una antigüedad inferior a un año.

Como es natural, mientras unas innovaciones están ahorrando electricidad, otras utilizarán la electricidad en nuevos campos en los que su uso resulta más ventajoso que otras formas de energía. Por ejemplo, la electricidad puede ser beneficiosa para el ambiente y con un coste menor en determinadas aplicaciones industriales: recubrimientos de superficies, calentamiento y secado por microondas, calentamiento por inducción, etcétera. Todas estas electrotecnologías ahorran dinero, energía y contaminación. El Instituto de Investigación sobre Energía Eléctrica (IIEE o EPRI) ha estimado que hacia el año 2000 estas nuevas técnicas ahorrarán algo así como medio cuatrillón de unidades térmicas británicas (Btu) de energía cada año y, gracias a ello, el consumo de electricidad en los Estados Unidos sólo aumentará muy ligeramente.

¿Cuánta electricidad podría ahorrarse si hiciéramos todo lo posible, lo hiciéramos bien y utilizáramos las mejores técnicas de que disponemos para mejorar el rendimiento? Existe acuerdo en que con tales condiciones la electricidad ahorrada sólo en los Estados Unidos ascendería a cantidades asombrosamente elevadas, mucho más que entre el 5 y el 15 por ciento que se citaba hace algunos años. Según un informe emitido por el IIEE en este mismo año, sería técnicamente viable economizar entre el 24 y 44 por ciento de la electricidad consumida en los Estados Unidos en el 2000 (parte de ese ahorro a un coste bastante alto), además del 9 por ciento previsto actualmente. Por tanto, desde el punto de vista teórico, la realización de un esfuerzo máximo para mejorar el rendimiento podría representar entre tres y cinco veces los ahorros espontáneos previstos por el IIEE, y entre cuatro y siete veces más que las previsiones programadas (80.000 millones de watt antes del año 2000). El Instituto de las Montañas Rocosas estima que el ahorro potencial a largo plazo puede alcanzar hasta el 75 por ciento de la electricidad con un coste medio de 0,6 centavos de dólar por kilowatt-hora, una cantidad varias veces menor que el coste del combustible en una central de carbón o nuclear. El ahorro posible a un coste más elevado podría ser todavía mayor. Las diferencias existentes entre todas estas estimaciones no invalidan la conclusión general de que es posible ahorrar cantidades importantes de electricidad a un coste aceptable.

¿Qué relación hay entre los ahorros potenciales de electricidad en los Estados Unidos y las previsiones en otros países? Los ahorros potenciales varían considerablemente de un país a otro, debido sobre todo a las diferencias de clima, uso de dispositivos eléctricos, precios y estructura económica. Los europeos occidentales y los japoneses han alcanzado ya una buena parte de los ahorros de electricidad potenciales y, a medida que estas naciones continúen avanzando, tendrán que pagar más por menos ahorro de electricidad en relación con los norteamericanos, aunque las diferencias no son sustanciales. Los estudios realizados al respecto prevén un ahorro del 50 por ciento en Suecia

con un coste medio de 1,3 centavos de dólar por kilowatt-hora, el 75 por ciento en los edificios de Dinamarca también con un coste de 1,3 centavos de dólar por kilowatt-hora, y el 80 por ciento en los electrodomésticos de Alemania occidental con un coste que se amortizaría en un plazo de 2,6 años [*véase la figura 4*].

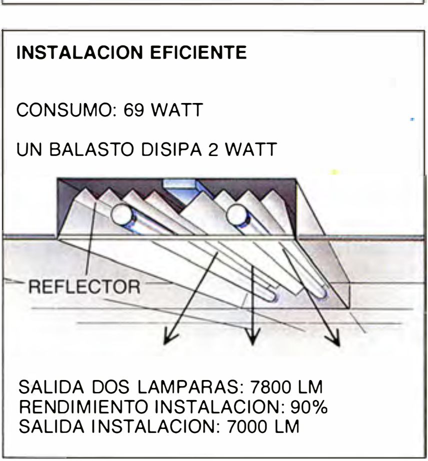
Una prueba sólida, si bien de carácter anecdótico, corrobora la intuición de que los dispositivos eléctricos utilizados en la mayoría de los países socialistas y de los países en vías de desarrollo son varias veces menos rentables que en los Estados Unidos. La fabricación de mejores dispositivos en esas naciones resulta con frecuencia muy costosa, ya que no suelen disponer de la electrónica ni les es fácil el acceso a los materiales a utilizar en los mismos. Sin embargo, conforme los mercados de estos productos se extiendan, disminuyendo sus precios internacionales, parece razonable esperar que los ahorros de electricidad potenciales aumentarán también en los países derrochadores. Las previsiones de los Estados Unidos pueden ser, pues, aplicables a un contexto global.

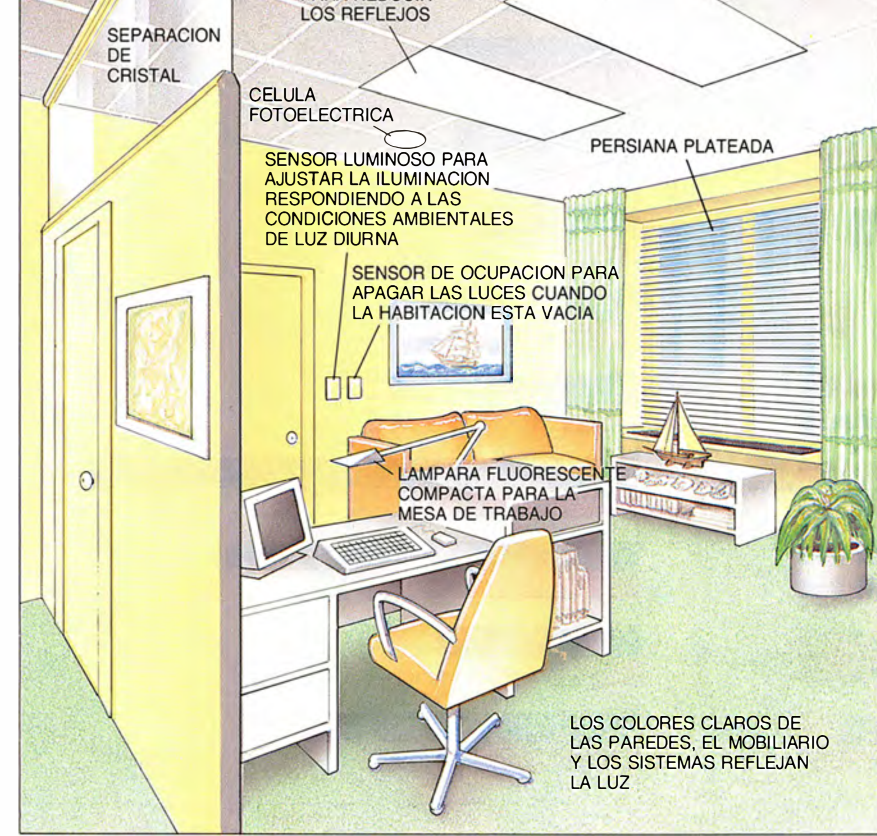
Para comprender mejor los problemas que supone la actual situación y el esfuerzo que se requiere para evolucionar hacia una economía menos dispendiosa, las compañías eléctricas y los usuarios deben conocer la manera de lograr mayores ahorros. La electricidad, como las demás formas de energía, se puede ahorrar exigiendo menos e inferiores servicios, por ejemplo, cerveza más caliente, duchas más frías, luces más mortecinas, etcétera. Aquí no vamos a tomar en consideración estas opciones. Si la técnica se aplica de modo inteligente, se puede ahorrar electricidad sin sacrificar la calidad de los servicios. De hecho, muchos dispositivos modernos funcionan mejor que los equipos que han reemplazado, proporcionando una iluminación más agradable, una producción más segura y unos niveles más altos de confort y control.

Los ahorros más importantes se pueden alcanzar en unas pocas aplicaciones: alumbrado, sistemas de motores y refrigeración de alimentos y edificios. El alumbrado en los Estados Unidos consume la cuarta parte de la electricidad que produce, un 20 por ciento directamente y el 5 por ciento restante en equipos de refrigeración para compensar el calor indeseado que las luces emiten. En un edificio comercial típico, el alumbrado representa las dos quintas partes de toda la electricidad consumida, o más de la mitad si incluimos el consumo que supone la subsiguiente refrigeración. La sustitución de los sistemas tradicionales por los modernos permitiría ahorrar entre el 80 y 90 por ciento de la electricidad gastada en el alumbrado, de acuerdo con una estimación del laboratorio Lawrence de Berkeley. El IIEE sugiere también que se podría ahorrar hasta un 55 por ciento de la electricidad consumida utilizando sistemas con un coste asumible.

Por ejemplo, el consumo de electricidad de las modernas lámparas fluorescentes compactas es entre un 75 y 85 por ciento menor que el de las bombillas incandescentes ordinarias.







3. LOS MIL QUINIENTOS MILLONES de instalaciones de alumbrado existentes en los edificios de los Estados Unidos podrían consumir un 60 por ciento menos de electricidad (entre el 70 y 90 por ciento menos) si incorporaran las modernas técnicas de que se disponía en el año 1988. El rendimiento de las lámparas mejora gracias a la utilización de fósforos y al hecho de que estas lámparas trabajan a temperaturas más bajas y frecuencias más altas (del orden de 30 kilohertz). Estos equipos cuestan menos de 130 dólares por unidad, permiten ahorrar 50 dólares en costes de mantenimiento a largo plazo y se amortizan en uno o dos años. Las nuevas lámparas ahorran electricidad a razón de 0,6 centavos por kilowatt-hora. Las otras opciones a las que se refiere esta figura permiten ahorrar casi el 100 por ciento en los edificios diseñados para aprovechar la luz diurna.

Además, la duración de las lámparas fluorescentes es entre 9 y 13 veces mayor que la de las bombillas incandescentes. Si se toma en consideración el mayor coste inicial de las lámparas y los costes de instalación (las lámparas cuya vida es mayor no necesitan cambiarse con tanta frecuencia), se puede recuperar el coste de las lámparas fluorescentes y ahorrar todavía muchos dólares a lo largo de la vida de cada una de éstas. De este modo, se puede ganar dinero incluso sin contar con el ahorro de electricidad.

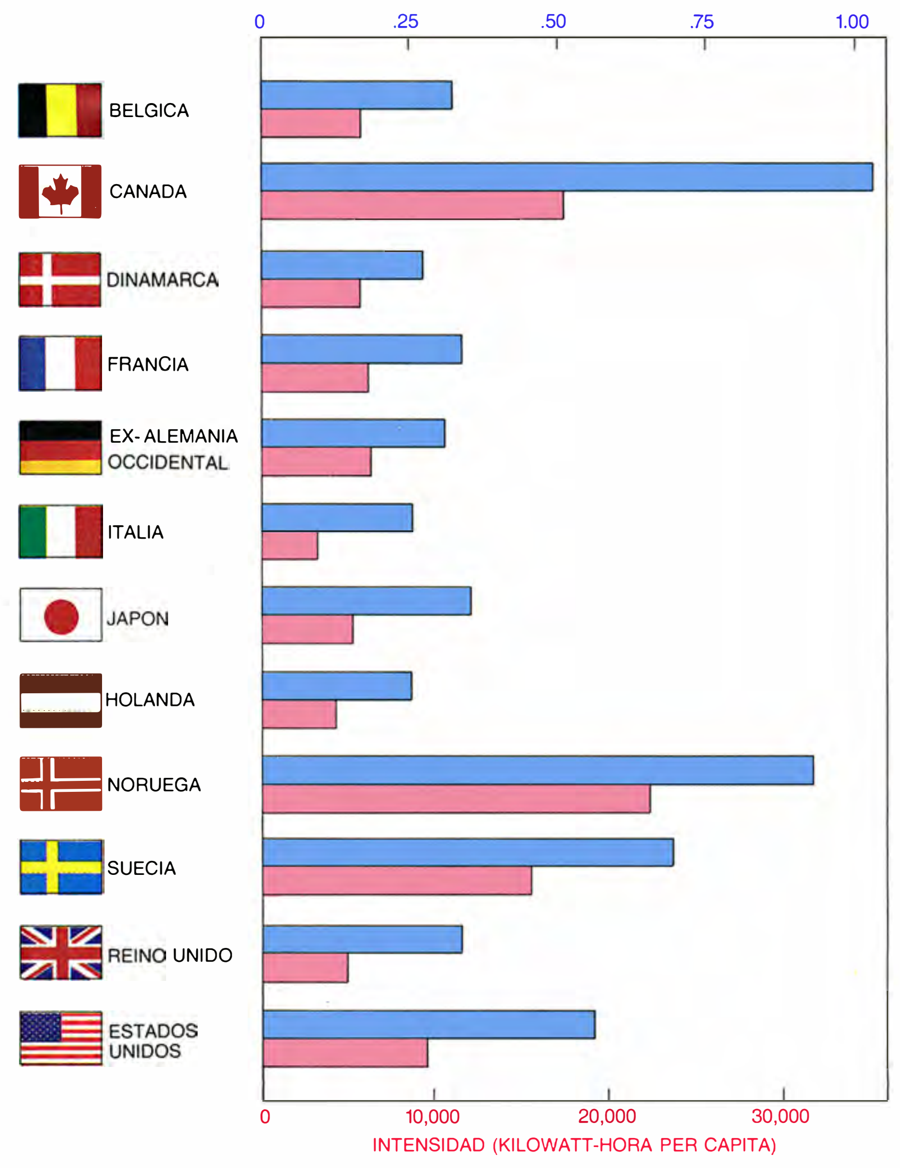
Actualmente se dispone de equipos de alumbrado eficiente para casi cualquier aplicación. La mayoría de estos dispositivos proporcionan la misma cantidad de luz que los sistemas antiguos, con menos deslumbramiento, menos ruido, un color más agradable y ausencia de fluctuaciones. Estas mejoras estéticas implican también ahorros todavía mayores; el aumentar la productividad de una oficina en un 1 o 2 por ciento sale más rentable que eliminar las facturas de electricidad en los gastos generales de mantenimiento.

Juntadas todas las innovaciones hoy viables en el alumbrado se ahorraría entre la séptima y la quinta parte de toda la electricidad consumida en los Estados Unidos. La instalación de tales dispositivos costaría un centavo de dólar por kilowatt-hora. El Instituto de las Montañas Rocosas ha calculado que, gracias a los costes de mantenimiento reducidos, se ahorrarían otros 2,4 centavos por kilowatt-hora consumido. Los ahorros de electricidad aliviarían la necesidad de instalar centrales eléctricas con una potencia total entre 70.000 y 120.000 millones de watt, con un coste de construcción estimado entre 85.000 y 200.000 millones de dólares y un coste de funcionamiento entre 18.000 y 30.000 millones de dólares anuales. De este modo, las innovaciones introducidas en la iluminación se pueden convertir en una gran mina de oro para toda la economía de un país [*véase la figura 3*].

Tras el alumbrado, los motores eléctricos ofrecen el mejor campo donde conseguir importantes ahorros. Los motores consumen entre el 65 y 70 por ciento de la electricidad industrial y más de la mitad de toda la generada en los Estados Unidos. La factura anual de la electricidad consumida por los motores supera los 90.000 millones de dólares; se lleva, pues, el 2 por ciento del producto nacional bruto.

La electricidad que consume un motor industrial corriente de gran tamaño cuesta entre 10 y 20 veces más que su valor de capital por año: el coste de capital varía entre el 1 y 3 por ciento de su coste total a lo largo de toda su vida. A lo largo de la vida de un motor, una ganancia del orden del 1 por ciento en el rendimiento representa un ahorro superior a 10 dólares en los gastos de inversión por caballo de potencia. Si multiplicamos los muchos puntos de porcentaje de ahorro posible por los cientos o miles de caballos de potencia que poseen los grandes motores, encontraremos que las cifras resultantes son muy elevadas. Finalmente, debemos tener en cuenta que una gran planta industrial puede tener centenares de estos motores.

Muchas máquinas, especialmente bombas y ventiladores, necesitan acomodar su potencia de salida para adecuarse a las necesidades variables de los procesos en los que intervienen. Este cambio se suele llevar a cabo haciendo funcionar la bomba o ventilador en cuestión a plena velocidad y "regulando" su potencia de salida mediante una válvula parcialmente cerrada, lo que viene a ser conducir un automóvil con un pie en el acelerador y el otro en el freno. Los modernos dispositivos electrónicos con velocidad ajustable pueden cortar ese despilfarro. Cuando sólo se necesita la mitad del flujo que puede proporcionar una bomba, se puede ahorrar en teoría los 7/8 de su potencia; en la práctica, la cifra se acerca



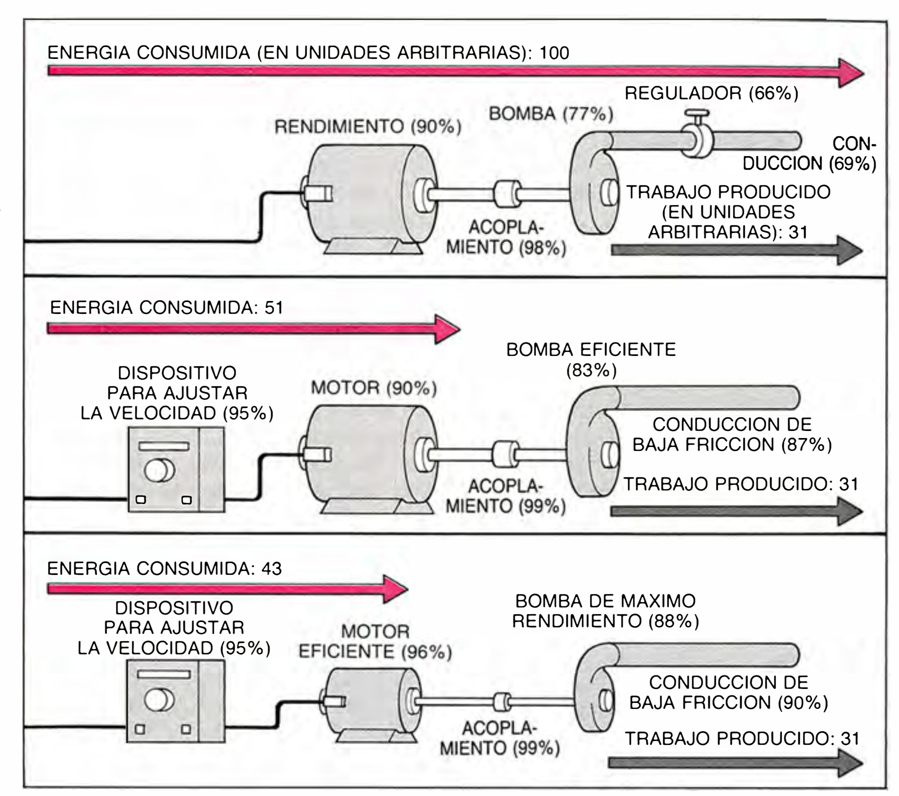
4. DIFERENCIAS EXISTENTES en los hábitos de muchos países desarrollados; cada uno debe tener una gran flexibilidad a la hora de escoger las estrategias más adecuadas para consumir y suministrar electricidad. Las barras azules indican el consumo de electricidad por cada dólar de producto interior bruto referido al año 1986; las rojas reflejan el consumo de electricidad por persona en dicho año.

bastante a este valor, gracias al alto rendimiento de tales dispositivos electrónicos. El ahorro puede variar de un 10 a un 40 por ciento, con aplicaciones típicas que reducirían la energía total consumida por los motores en los Estados Unidos en un 20 por ciento. La amortización se produciría en un plazo de seis meses a tres años, con un valor medio de un año.

La nueva generación de motores de elevado rendimiento representa otro avance principal. Mejor diseñados y mejor construidos con materiales de mayor calidad que los motores convencionales, éstos reducen sus pérdidas magnéticas, resistivas y mecánicas a menos de la mitad de los niveles corrientes hace una década. Aunque los nuevos motores abundan ya en América del Norte, Europa occidental y Japón, no existen todavía en algunos países industrializados (Australia), ni en gran parte de los países del ex-bloque socialista o en vías de desarrollo, en los que el rendimiento de los motores suele ser muy bajo.

Para la mayoría de los ingenieros sólo existen dispositivos con velocidad variable y motores de alta eficiencia. Aunque ambas técnicas son importantes, sólo representan la mitad del ahorro potencial total de electricidad en los sistemas de motores de los Estados Unidos. El otro 50 por ciento se refiere a otras 33 mejoras diferentes relacionadas con la elección, mantenimiento y tamaño de los motores, tres nuevos tipos de controles y la eficiencia con que la electricidad se suministra a los motores y el par mecánico se transmite a la correspondiente máquina. Los nuevos sistemas de motores consumen aproximadamente la mitad de electricidad. En principio, el ahorro total que esto supone sólo en los Estados Unidos equivale a una potencia entre 80.000 y 190.000 millones de watt. Por otra parte, el coste de los nuevos motores se suele amortizar en un plazo de 16 meses, pues sólo hay que pagar por siete de las 35 mejoras posibles (incluidos los dispositivos de velocidad variable y los motores de alto rendimiento); las mejoras restantes son, en realidad, subproductos gratuitos.

Los progresos en las tecnologías de alumbrado y motores vienen acompañados por los avances en las aplicaciones muy rentables. Los nuevos modelos de refrigeradores y congeladores consumen entre el 80 y 90 por ciento menos electricidad que los modelos convencionales. Los sistemas de refrigeración comerciales pueden ahorrar hasta un 50 por ciento, los televisores el 75 por ciento, las fotocopiadoras el 90 por ciento y los ordenadores el 95 por ciento. A modo de botón de muestra, el Instituto de las Montañas Rocosas ha instalado un nuevo sistema completo de luces y aparatos modernos en su sede central (que ocupa una superficie de unos 400 metros cuadrados), merced al cual su consumo de electricidad ha caído en un factor diez, ascendiendo a tan sólo 5 dólares al mes. Este Instituto ha reducido también su consumo de agua en un 50 por ciento y ha disminuido en un 99% la cantidad de energía eléctrica necesaria para calentar el aire y el agua. (El aislamiento del edificio es tal que, aunque está situado en el clima subártico de las montañas de Colorado, no necesita calderas de calefacción.) Además, toda la tecnología moderna utilizada se ha amortizado en el plazo de un año.



5. UTILIZACION DE UN EQUIPO ADECUADO para aumentar el rendimiento del motor de una bomba típica (*parte superior*) entre el 31 y 72 por ciento y amortizarlo en dos o tres años (o un plazo todavía menor si se tienen en cuenta los costes de mantenimiento). Un dispositivo electrónico (*centro*) propicia el rendimiento de los restantes componentes del sistema. El ahorro neto total resultante puede llegar al 21 por ciento, sin contar las pérdidas que se producen en las conducciones. Mediante un sistema de bomba y motor más eficiente y con un tamaño más adecuado, así como mejores conducciones, se puede obtener un ahorro todavía mayor (*parte inferior*), en parte gracias a la corrección de las averías producidas en las reparaciones mal efectuadas del viejo motor. Tomando otras medidas técnicas más refinadas se puede llegar a reducir el consumo de energía hasta en un 40 por ciento.

La explotación de la gama de posibilidades existentes de aumentar el rendimiento puede multiplicar por dos las cantidades ahorradas y reducir a menos de la mitad los costes correspondientes. Ahorrar electricidad viene a ser comer langosta: si sólo se aprovechan los apéndices y se desecha el resto, se pierde una cantidad similar de sabrosos bocados escondidos en el resto del cuerpo. Para economizar mucha electricidad, y a bajo coste, no sólo se deben incorporar las nuevas técnicas, sino también replantear la ingeniería de los sistemas, prestando una gran atención a los detalles.

Este replanteamiento exigirá una nueva infraestructura para suministrar conjuntos integrados basados en técnicas modernas. Tan sólo algunas empresas fabrican sistemas globales de alumbrado eficiente. En el caso de los motores, el número de empresas capaces de suministrar estos equipos es todavía menor. Sin embargo, la producción de equipos capaces de ahorrar electricidad representa un negocio potencial capaz de mover centenares de miles de millones de dólares anuales, un gran premio a la espera de empresarios decididos.

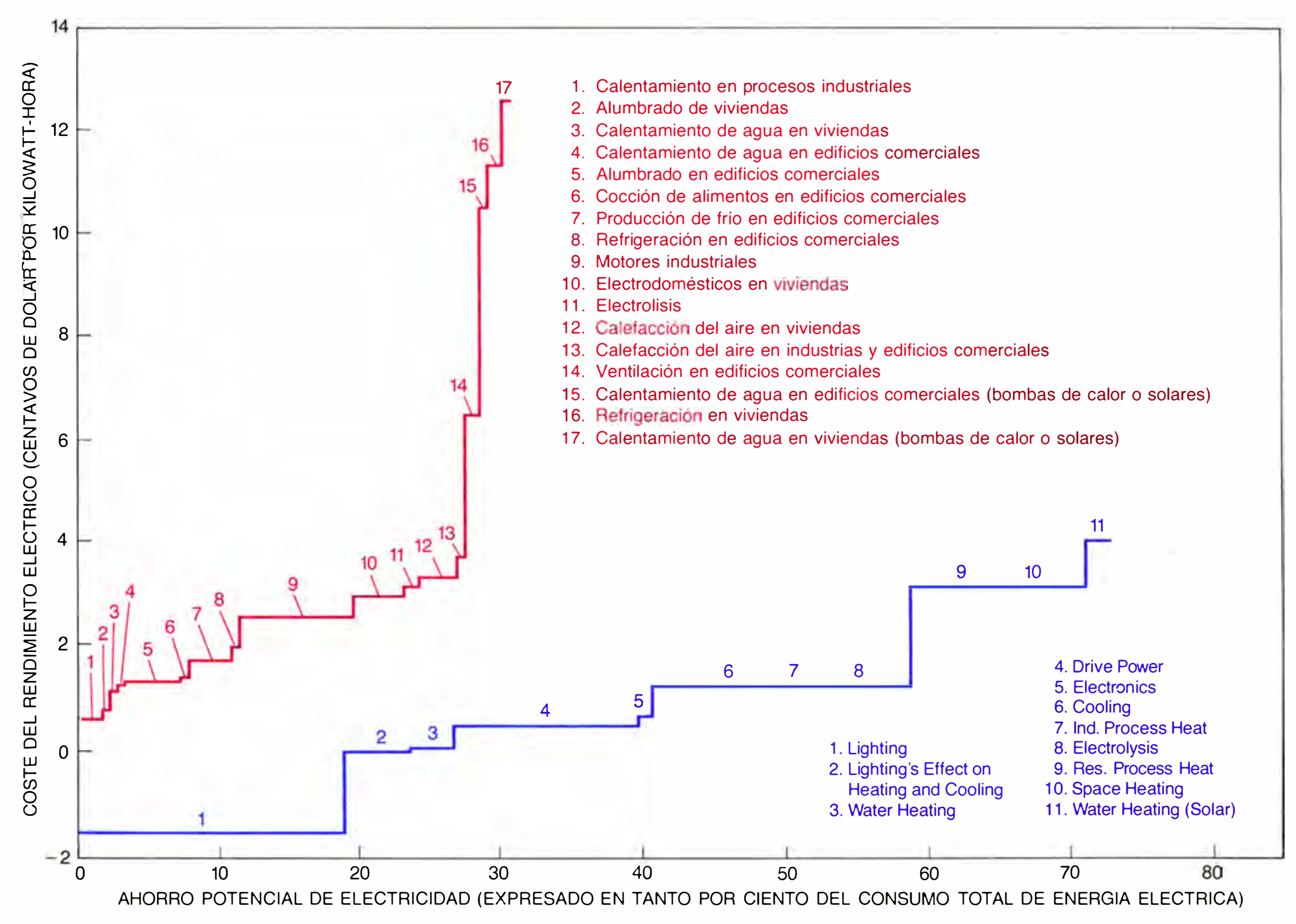
Lo mismo que ocurre con las centrales eléctricas, para que el ahorro se produzca los programas correspondientes deben haberse ya diseñado,

financiado, construido y puesto en funcionamiento. Como en la extracción de un recurso mineral de la tierra, hemos de determinar cuánta electricidad se puede ahorrar utilizando las tecnologías existentes y cuánta se necesitará para convertir esa reserva en la producción práctica.

Las técnicas rentables se encuentran con frecuencia infrautilizadas por falta de demanda de los consumidores (demanda del mercado), por falta de canales de distribución adecuados (oferta del mercado) o por ambas causas a la vez. Si los consumidores de electricidad desean sistemas más eficientes y piden a los comerciantes que se los suministren, éstos presionarán a los almacenistas que se los envíen, quienes forzarán a los fabricantes para que los elaboren. Si los consumidores no actúan, toda la cadena de beneficios potenciales se malogra.

Para crear una demanda de mercado, los gabinetes de estudio implicados en el tema deben conocer los criterios por los que se rige el usuario en sus decisiones. La mayoría de esos planificadores se sorprenden ante el rechazo ocasional del factor eficiencia aunque venga acompañada por atractivos incentivos económicos. En el pasado, ni los fabricantes ni los comerciantes consideraban el rendimiento un elemento importante de los nuevos productos, pues veían que los consumidores no se guiaban en sus compras por ese incentivo. Los criterios que determinan fundamentalmente su elección son el aspecto, seguridad, confort, conveniencia, control, economía, fiabilidad, elementos de alta tecnología, afán de poseer los equipos más modernos, deseo de evitar averías y resistencia a poseer equipos que controlen el uso de la energía. Porque la naturaleza humana es muy variable, la importancia relativa de todos estos factores cambia bastante de unos individuos a otros y, por tanto, los comerciantes ajustan sus estrategias comerciales a esta situación. Los productores y distribuidores se mueven bajo los efectos de una serie de preocupaciones análogas, tales como la calidad de los productos, fiabilidad de la fabricación, flexibilidad en el consumo de energía, ausencia de efectos contaminantes sobre el medio ambiente, limpieza en el lugar de trabajo y bajo riesgo.

El uso generalizado de técnicas rentables reclama, quizá, la intervención de un tercer agente, las compañías eléctricas o los gobiernos, para regular la oferta y la demanda del mercado. Como veremos más adelante, las compañías tienen un especial interés en influir sobre la demanda de los usuarios (considerando dicha demanda, no como una fatalidad, sino como una elección), con el fin de proporcionar mejores servicios a un coste menor y, al mismo tiempo, aumentar sus beneficios y reducir sus riesgos comerciales. Las compañías pueden elegir entre una amplia variedad de métodos de oferta y demanda de mercado, que influyen en la elección de los consumidores y eliminan las barreras. Abarcan estas posibilidades los incentivos u otras opciones económicas, el contacto directo con los usuarios, la aplicación de tarifas especiales, la publicidad, la educación y la participación en los proyectos de arquitectos, ingenieros y productores de técnicas eficientes. Considerados en su conjunto, estos esfuerzos forman parte de la gestión de la demanda por parte de dichas compañías, gestión que se propone modificar la



6. TECNICAS DEL RENDIMIENTO capaces de reducir el consumo de electricidad en los Estados Unidos con un coste tan bajo como el estimado por el Instituto de Investigación sobre Energía Eléctrica (*línea de color rojo*) y por el Instituto de las Montañas Rocosas (*color azul*), en dólares de 1990.

demanda de electricidad y al mismo tiempo satisfacer las necesidades de los usuarios.

Más de 60 compañías eléctricas que atienden el suministro de casi la mitad de los norteamericanos ofrecen ahora programas de incentivos económicos para promover la compra o venta de dispositivos rentables. La inmensa mayoría de estas compañías (92 por ciento) ofrecen estos incentivos a los usuarios con el fin de estimular la demanda en el mercado; un 24 por ciento de ellas pagan a los comerciantes de tales artículos para crear una oferta en el mercado. Los programas de incentivación pueden estimular un rápido desarrollo del mercado de los dispositivos eficientes.

Muchas compañías eléctricas han empezado a pagar a los usuarios por cada kilowatt-hora ahorrado, donde fuere y como fuere. Se han aprestado también a subvencionar determinados "aliados comerciales" encargados de desmontar los equipos viejos y derrochadores o de vender e instalar equipos modernos y eficientes. Las compañías ofrecen incentivos económicos a los usuarios que superan las normativas gubernamentales de funcionamiento, gracias a lo cual se pueden desarrollar técnicas cada vez más avanzadas e ir más allá de la normativa hasta alcanzar los límites establecidos por el binomio coste-eficacia.

Otras formas de incentivos económicos consisten en préstamos a bajo o nulo interés, y en el regalo o alquiler de equipos. Por ejemplo, la Southern California Edison Company ha regalado más de 800.000 lámparas fluorescentes compactas. La Taunton Municipal Lighting Plant en Massachusetts alquila estas lámparas por 20 centavos mensuales y, cuando se estropean, las sustituye por otras nuevas gratuitamente. De este modo, los usuarios pagan el rendimiento en el tiempo, de forma parecida a como pagan el coste de las grandes centrales eléctricas. Los fabricantes de lámparas fluorescentes compactas han conseguido, con sus propios esfuerzos y la colaboración de las compañías eléctricas, unas cifras de ventas del orden de 20 millones de unidades en los Estados Unidos. Este volumen se duplica o triplica cada año. Idéntico tipo de lámparas domina ya los mercados de Alemania.

De la rentabilidad de estos métodos nos habla un ejemplo: cuando la Southern California Edison Company tuvo una carga máxima de 15.000 millones de watt, en el invierno de 1983-1984, fue capaz de reducir sus previsiones de demanda máxima en más de 500 millones de watt en un solo año. Al mismo tiempo, la aplicación de las normativas de la edificación y los electrodomésticos en California permitió ahorrar cantidades todavía mayores de fluido. Los ahorros anuales representaban el 8,6 por ciento de la demanda máxima de la compañía en aquella época; este ahorro sólo costó a la empresa el 1 por ciento de lo que habría supuesto la construcción y funcionamiento de una nueva central eléctrica. Si todos los norteamericanos ahorraran electricidad como lo hicieron entonces esos 10 millones de ciudadanos, la economía de los Estados Unidos podría experimentar un aumento de varios enteros anuales y, al mismo tiempo, bajaría el consumo total de electricidad.

El éxito de todas estas iniciativas se ha difundido por los Estados Unidos y otros países del mundo. En algunos casos, las propuestas más inteligentes e imaginativas han llegado a cubrir entre el 70 y 90 por ciento de los mercados específicos de la eficiencia (aislamiento de las viviendas, por ejemplo) en el plazo de uno o dos años. Algunas compañías están consiguiendo ahorros muy importantes mediante programas comerciales de eficiencia. Otras ofrecen energía eléctrica a bajo coste a los clientes ahorradores. Las hay que exigen unos niveles de rentabilidad mínima como condición para suministrar energía. En algunas partes se está empezando a aplicar una escala móvil para la facturación del consumo: cuando una compañía conecta un nuevo edificio a la red, carga una cantidad en función de las prestaciones economizadoras del edificio. Se está estudiando también la posibilidad de utilizar tarifas especiales para los edificios que se muestren más cuidadosos en el aprovechamiento del fluido.

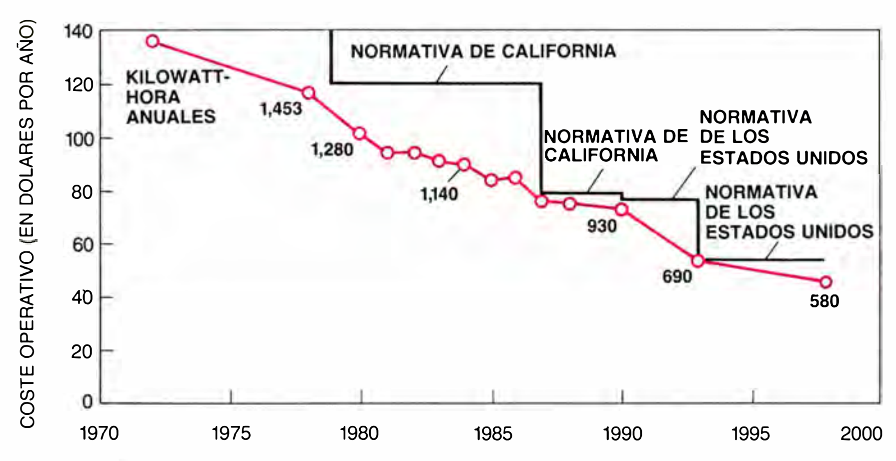
Cabe economizar con métodos que no se basan en el comercio de los "negawatt" (energía ahorrada), sino en crear un mercado de negawatt: la electricidad ahorrada entendida como un producto comercial, a modo del cobre o los cereales. Esta estrategia favorece la competencia entre los diferentes métodos de ahorro energético y entre las diferentes ofertas para conseguir tales economías. De esa manera contribuye a reducir todavía más los costes. Hay ya compañías que compiten en su oferta de procesos alternativos para ahorrar electricidad.

La electricidad ahorrada, convertida en dinero, puede ser objeto de transacción entre diferentes compañías o sectores de usuarios. Algunas empresas pueden incluso convertirse en "corredores de negawatt" y manejar mercados de presente y futuro en electricidad ahorrada. Otras compañías están tomando en consideración la firma de contratos con sus clientes para estabilizar o reducir la demanda de electricidad. Estos contratos podrían venderse en mercados secundarios, de forma parecida a como actúan los corredores que compran y venden los derechos de contaminación del aire.

En esa carrera comercial hacia el nuevo mercado de los negawatt, algunas compañías venden "rendimiento" en los territorios de otras compañías. Puget Sound Power and Light Company vende electricidad en un solo estado de la Unión, pero sus empresas subsidiarias venden rendimiento en otros nueve estados.

Aunque algunas compañías y consumidores son plenamente conscientes de las ventajas que representa la eficiencia eléctrica, la mayoría de los ahorros potenciales todavía no se han alcanzado. Los criterios económicos que mueven a los usuarios para ahorrar electricidad difieren mucho de los que usan las compañías para construir nuevas centrales. Por una parte, cuando los usuarios invierten dinero para economizar fluido en sus hogares o sus negocios, desean recuperar su inversión en un plazo de un par de años, quizás hasta cinco años en el caso de industrias con visión de futuro, pero posiblemente menos de un año en el caso de una familia con bajo nivel de ingresos. Por otra parte, cuando las compañías construyen nuevas centrales con el fin de aumentar su capacidad de producción, su potencia económica y técnica les permite recuperar su coste en un plazo de 20 años.

El hiato existente entre los horizontes de amortización de los consumidores y las compañías productoras hace que la sociedad tienda a comprar muy poca eficiencia y mucho suministro. El resultado de esta situación, sólo en los Estados Unidos, se traduce en los 60.000 millones de dólares anuales que se gastan en incrementar la capacidad de suministros eléctricos y que podrían desviarse en parte hacia las inversiones en un mayor aprovechamiento. La citada diferencia afecta también directamente a los precios de la electricidad. Por ejemplo, cuando los usuarios pueden evitar una tarifa de seis centavos por kilowatt-hora ahorrando electricidad, sin necesidad de ningún otro incentivo comprarán rendimiento a un coste de 0,6 centavos por kilowatt-hora, es decir, una cifra igual a la décima parte de la tarifa, dado que dicha tarifa ha sido calculada por la compañía con un horizonte de 20 años, pero el consumidor invierte sobre la base de un ho-



7. NORMATIVAS GUBERNAMENTALES para promover la fabricación de neveras que saquen mayor partido a su rendimiento eléctrico. El coste de mantenimiento de un modelo medio de 1990 es unos 64 dólares menor que el de un prototipo fabricado en 1970. Los datos recogidos han sido recopilados por la Association of Home Appliance Manufacturers y el laboratorio Lawrence.

rizonte de sólo 2 años. En consecuencia, la aplicación de una política de precios adecuados quizá no baste para inducir a las personas que compren el rendimiento necesario para beneficiar a la sociedad en su conjunto a largo plazo. Sin embargo, la aplicación de precios justos es muy importante: sólo los precios que dicen la verdad informan adecuadamente a los usuarios acerca de cuánto es bastante. Estos precios deberían ajustarse a la hora del día y a la estación del año en que se utiliza la electricidad (tal vez mediante el empleo de nuevos y refinados contadores electrónicos) y basarse en los consumos producidos en una escala en tiempo real.

Las compañías de todo el mundo están revisando sus objetivos. ¿Deben ceñirse esas empresas a la producción y venta de electricidad? ¿Deben también atender adecuadamente a las necesidades de los usuarios, obteniendo además un beneficio? Las compañías que se decantan por este segundo enfoque creen que, si la electricidad cuesta más que el rendimiento, los usuarios advertirán que pueden ahorrar fluido y dinero, sin dejar la ducha caliente y la cerveza fría con termos muy rentables y neveras de alto rendimiento. Pero, ¿quién venderá entonces el "rendimiento"? Si éste es más barato que la electricidad, los usuarios comprarán menos electricidad y más eficiencia. La estrategia comercial correcta es aquella que satisface las necesidades de los usuarios antes de que lo haga otro.

Las compañías eléctricas son las organizaciones lógicas para impulsar el uso de dispositivos rentables: poseen capacidad técnica, permanencia, credibilidad, relaciones estrechas con los consumidores, costes de capital relativamente bajos e ingresos estables. Pero la verdad es que las compañías no muestran especial interés en proporcionar dicho impulso. ¿Por qué, puede objetarse, gastar dinero para reducir los ingresos por recibo?

En principio, las compañías eléctricas pueden beneficiarse de varias formas promoviendo el aprovechamiento del fluido por sus clientes. Evitan costes de operación a corto plazo, costes de construcción de nuevas centrales a medio plazo y costes de sustitución de las centrales viejas a largo plazo. Se pueden beneficiar también de un ahorro en los correspondientes costes financieros, de forma parecida a como lo haría un banco. La legislación sobre protección del medio ambiente puede permitir que las compañías utilicen el rendimiento para comerciar los derechos de contaminación que les corresponden con otras empresas más derrochadoras. Y por último, bajo las normativas que han entrado recientemente en vigor en algunas partes, las compañías pueden recibir importantes incentivos financieros por sus inversiones dirigidas a fomentar el ahorro económico.

En 1989 surgió un nuevo elemento de gran importancia, cuando se promulgaron leyes federales que merecieron, en principio, la consideración de todos los estados de la Unión. La normativa establece que los beneficios de las compañías deben tomarse en cuenta al margen de sus ventas, con lo cual se elimina la falta de interés de las compañías para invertir en eficiencia. De acuerdo con ese mandato legal, las compañías serán recompensadas por los ingresos que en otro caso perderían si vendieran menos electricidad y podrán mantener una parte de los ahorros que generen con esta nueva política.

La normativa ha comenzado a dar sus frutos. La californiana Pacific Gas & Electricity Company y un grupo formado por expertos en medio ambiente, funcionarios y usuarios, se han puesto de acuerdo para establecer que la sociedad se reservaría el 15 por ciento de todo el dinero ahorrado por la puesta en marcha de determinados programas de eficiencia. Los usuarios se beneficiarían con el 85 por ciento restante, algo mejor que ganar el todo de nada.

En Nueva York, la empresa Niagara Mohawk Power Corporation ha propuesto otra forma de beneficiarse de servicios rentables. Se prevé que los 12 programas de rendimiento que propone la compañía, cuya puesta en marcha este año costará 30 millones de dólares, permitan recuperar los costes de la inversión y produzcan un beneficio de 1 millón de dólares, sobre la base de que dichos programas hagan posible que los usuarios ahorren 133 millones de kilowatt-hora, lo cual representa un valor de 10 millones de dólares anuales. En el año 1992 dichos programas permitirán ahorrar 240 millones de kilowatt-hora anuales. ¿De dónde viene el dinero? Aunque los precios del kilowatt-hora aumentarán en 1,4 por ciento, los recibos que deberán pagar los usuarios serán más bajos dado que consumirán menos.

El programa de medidas de bajo coste aplicadas por la citada compañía para la electricidad consumida en las viviendas prevé instalar, en todas las viviendas, duchas de bajo flujo, lámparas fluorescentes compactas y aislamiento térmico en todos los calentadores eléctricos y conducciones de agua. Todo este equipo permitirá ahorrar 960 kilowatt-hora anuales en el consumo de cada vivienda. La compañía pierde 72 dólares en los recibos por vivienda, pero ahorra 40 dólares en combustible y costes de funcionamiento. La diferencia entre ambas cantidades (32 dólares anuales) se carga a los usuarios a lo largo de 8 años, incluyendo un beneficio de 5 dólares para la compañía. Por lo que respecta al equipo, cada usuario paga 6 dólares anuales a lo largo de 8 años. Por tanto, cada vivienda ahorrará un total de 272 dólares en ese intervalo.

¿En qué medida el desarrollo e instalación de técnicas rentables cambiarán las economías de nuestros negocios, los servicios que recibimos y la calidad del medio ambiente? Empecemos por la incidencia del rendimiento sobre los negocios locales. En Osage, población del estado de Iowa de 4000 habitantes, el gerente de una compañía lanzó un programa de nueve años para acondicionar las viviendas y controlar las cargas de electricidad en las horas punta. Esta

iniciativa ahorró a la compañía el dinero suficiente para pagar todas sus deudas, acumular un superávit y reducir los efectos de la inflación a la tercera parte (además de atraer a dos nuevas industrias a dicha ciudad). Por su lado, cada vivienda ahorró más de 1000 dólares anuales, mejorando así la economía general de la localidad y haciendo que la prosperidad de los comercios aumentara por encima de los situados en otros pueblos próximos.

El mejor aprovechamiento de la energía eléctrica puede también aumentar la competitividad industrial. Por ejemplo, cuando las empresas relacionadas con el tendido (cables, alambres, etcétera) atravesaron grandes dificultades, en torno al año 1980, Southwire, la compañía más importante de los Estados Unidos en el sector, respondió con un plan de ocho años para ahorrar un 60 por ciento del gas y un 40 por ciento de la electricidad consumidos. Estos ahorros equivalen en la práctica a todos los beneficios de la compañía durante dicho período. Los esfuerzos de dos de los ingenieros de esta empresa pueden haber salvado con ello los 4000 puestos de trabajo con que cuentan las instalaciones de la Southwire.

El rendimiento o mayor aprovechamiento puede contribuir a vencer uno de los mayores obstáculos que se oponen al desarrollo. En el Tercer Mundo, la producción de electricidad consume una cuarta parte del capital global destinado al desarrollo; se prevé que, a lo largo de las próximas décadas, las necesidades de capital de las compañías eléctricas de esas naciones multipliquen por ocho la cantidad disponible. Esta situación desembocará forzosamente en restricciones. El énfasis en el rendimiento puede proporcionar la solución para ahorrar el capital que se necesita desesperadamente para otras inversiones en la promoción de esos pueblos.

La eficiencia eléctrica mejora la calidad del medio ambiente. Cuando el usuario reemplaza una bombilla de 75 watt por una lámpara fluorescente compacta de 18 watt que dura 10.000 horas, la cantidad de electricidad que economiza equivale a la producida por una central eléctrica corriente consumiendo 350 kilos de carbón. Merced a ello, no llegarán a la atmósfera los más de 700 kilos de dióxido de carbono y 8 kilos de dióxido de azufre que se emitirían. Se libra, pues, de esa carga el calentamiento global de la tierra y la lluvia ácida. Por otra parte, una central eléctrica que consuma fuel oil ahorraría unos 280 litros de combustible, una cantidad suficiente para que un automóvil pueda viajar miles de kilómetros. A todo ello hay que añadir que el uso de dicha lámpara permitiría ahorrar hasta 100 dólares del coste neto que supone la producción de electricidad. Puesto que ahorrar combustible es más barato que quemarlo, la resolución de los problemas ambientales puede producir un beneficio económico. (En las centrales alimentadas por combustible fósil se consumen tres unidades de combustible para producir una unidad de electricidad; en los países del ex-bloque socialista y en el Tercer Mundo el rendimiento de las centrales es menor y se necesitan de cinco a seis unidades de combustible para generar la misma cantidad de electricidad.)

Con independencia de cómo se produzca el aprovechamiento de la energía para reducir las emisiones ambientales, compañías y usuarios conseguirán las máximas reducciones al menor coste y en el menor tiempo posible sólo si han seleccionado de antemano las opciones mejores. Supongamos que un gobierno desea reducir las emisiones de dióxido de carbono mermando la cantidad de electricidad producida en centrales alimentadas con carbón. Para reemplazar esta electricidad, el gobierno debería invertir en opciones eficientes de bajo coste (alumbrado o motores) antes de tomar en consideración otras técnicas alternativas de alto coste (energía solar o nuclear). De lo contrario, cada peseta invertida sustituiría menos carbón del que, en un principio, se podría. Cuando tenemos que luchar con recursos limitados, el orden de prioridad ambiental es equivalente al orden de prioridad económica.

La secuencia de mejores-opciones-primero sólo se puede aplicar cuando se dispone de una planificación adecuada para alcanzar costes mínimos o existe una planificación integral de los recursos. Una situación análoga se produce también cuando hay mercados equivalentes, en los que todas las formas de producir o ahorrar electricidad compiten por las inversiones marginales.

La comercialización del rendimiento favorece la producción sostenida de electricidad. Las técnicas implicadas en el mejor aprovechamiento facilitan el tiempo necesario para perfeccionar y difundir los recursos energéticos renovables tales como la energía solar, un campo en el que los avances recientes se han mostrado muy alentadores. Si la eficiencia reduce la demanda de fluido, los recursos renovables podrán introducirse sin trabas y, por tanto, se podrá ofrecer más electricidad a más gente. Tanto en un sentido general como en estrategias concretas, la electricidad bien aprovechada y los recursos renovables son socios naturales.

Las compañías constituyen una más de las muchas organizaciones que deberían fomentar el rendimiento. Las administraciones públicas aportarán gran ayuda educando adecuadamente a los usuarios sobre esta cuestión. Las administraciones centrales podrían dar ejemplo promoviendo la instalación de equipos eficientes modernos en todos los edificios de propiedad pública. Se convertirían así en la llave para desarrollar los mercados de estas técnicas. El gobierno podría subvencionar los elevados costes iniciales de fabricación de los equipos, verdaderos óbices para su difusión. Por otra parte, las autoridades podrían alentar a los fabricantes a producir equipos cada vez más eficientes, promoviendo la utilización de folletos explicativos de sus características operativas [*véase la figura 7*].

A los gobiernos corresponde también apoyar la investigación y el desarrollo de productos eficientes. Las inversiones en rendimiento no guardan relación directa con los beneficios potenciales. Fabricantes y usuarios no sólo necesitan más y mejores opciones de equipos eficientes, sino que precisan también ayudar mejor a los ingenieros para que éstos escojan correctamente entre las numerosas posibilidades de técnicas ya disponibles.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE STATE OF THE ART: LIGHTING. Amory B. Lovins et al. Implementation Papers, Servicio COMPETITEK del Instituto de las Montañas Rocosas, 1988-1990.

LEAST-COST UTILITY PLANNING HANDBOOK. National Association of Regulatory Commissioners, Washington, D.C., 1988.

THE STATE OF THE ART: DRIVEPOWER. Amory B. Lovins et al. Implementation Papers, Servicio COMPETITEK del Instituto de las Montañas Rocosas, abril de 1989.

END-USE/LEAST-COST INVESTMENT STRATEGIES. Report n.º 2.3.1. Congreso de la Conferencia sobre la Energía Mundial, Montreal, 17-22 de septiembre de 1989. Instituto de las Montañas Rocosas, 1989.

ELECTRICITY. Dirigido por T. B. Johansson, B. Bodlund y R. H. Williams. American Council for an Energy Efficient Economy, Washington, D.C., 1989.

EFFICIENT ELECTRICITY USE: ESTIMATES OF MAXIMUM ENERGY SAVINGS. Instituto de Investigación sobre la Energía Eléctrica, CU-6746, marzo de 1990.



Energía para edificios y viviendas

Las nuevas técnicas –superventanas, tubos fluorescentes compactos y sistemas automatizados de control– combinadas con otra serie de estrategias podrían reducir a la mitad los gastos energéticos en los edificios

Rick Bevington y Arthur H. Rosenfeld

En los Estados Unidos, que poseen una densidad de población moderada pero cuyo consumo de energía es muy elevado, los edificios absorben el 36 por ciento de la producción de energía de la nación, con un gasto que ronda los 200.000 millones de dólares. Los edificios de servicios (oficinas, grandes almacenes, escuelas y hospitales) tienen por sí solos un gasto anual de 80.000 millones de dólares. La energía, además de cara, ejerce un impacto tremendo sobre el medio ambiente; anualmente se producen 500 millones de toneladas de dióxido de carbono debido a la energía que consumen nuestros electrodomésticos y que calienta, enfría e ilumina nuestros edificios, lo que equivale a dos toneladas de dióxido de carbono por cada habitante de los Estados Unidos.

No obstante ese panorama, los estudios muestran que el aprovechamiento de la energía en los edificios podría doblarse hacia el año 2010, reduciendo a la mitad las emisiones de dióxido de carbono y ahorrando cien mil millones de dólares anuales, dinero que podría invertirse en la promoción del crecimiento económico. La verdad es que ya se han logrado avances significativos en el sector de la construcción, muchos de ellos surgidos de las crisis del petróleo de los años setenta. En esa década, la tendencia alcista en el consumo de energía en viviendas y edificios cayó en un treinta por ciento [*véase la figura 3*]. Sin embargo, en 1986, cuando el precio del petróleo bajó drásticamente, se estancaron los esfuerzos para obtener un mayor rendimiento. Hoy en día, aunque se continúan realizando mejoras en los edificios, se procede a un ritmo más lento; el resultado es que el consumo de energía en el sector inmobiliario norteamericano está ascendiendo nuevamente y crece a un ritmo anual del 3,3 por ciento.

1. EDIFICIOS DE SERVICIOS y sus enormes posibilidades de ahorro energético. Sustituyendo los sistemas de alumbrado y de calefacción, ventilación y aire acondicionado por nuevos equipos, se reduce el consumo en un 30 por ciento.

¿Cómo se puede explicar la tendencia actual? En primer lugar, la mayoría de los ocupantes de los edificios considera la energía como algo intangible y automático, y sólo se acuerdan de ella cuando se les expide el correspondiente recibo mensual. Los consumidores rara vez asocian cualquiera de los servicios que presta la energía, como refrigeración, alumbrado y calefacción, con las minas de carbón, los pozos petrolíferos y las centrales eléctricas que suministran ese fluido. No caen en la cuenta de que los edificios tienden a durar de 50 a 100 años, a diferencia de los automóviles, que se renuevan aproximadamente cada diez años, y, por tanto, las mejoras relacionadas con la energía redundan en la gestión económica de la vida de un edificio.

En lugar de desanimarse por el coste de estas mejoras, los consumidores las deberían contemplar como atractivas oportunidades de inversión. Esto se puede demostrar comparando el precio de dos casas nuevas en Chicago. Una de ellas posee paredes convencionales con un aislamiento estándar de 9 centímetros y un gasto anual de calefacción de 200 dólares. La otra tiene paredes más gruesas y 15 centímetros de aislamiento. Aunque la instalación de este aislamiento suplementario cuesta 300 dólares, el gasto anual de calefacción para la vivienda con mayor rendimiento sólo es de 80 dólares. De esta forma, el plazo de amortización del aislamiento dura sólo dos años y medio, lo que se traduce en un 40 por ciento anual de rédito para una inversión de 300 dólares. Desafortunadamente, los propietarios de viviendas no suelen considerar las ventajas de plazos de amortización de dos o tres años. En general, se preocupan más del precio inicial. Al comprar una vivienda no se detienen en su rendimiento energético; les interesa, sobre todo, tamaño, aspecto y ubicación.

Otro impedimento para obtener un mayor rendimiento energético es la fragmentación del negocio de la construcción. Por ejemplo, el proyecto de un edificio de servicios implica normalmente una serie de pasos intermedios: hay un arquitecto que diseña el edificio, pero a continuación entrega el proyecto a un ingeniero, que especifica los materiales, sistemas y componentes, antes de pasar la responsabilidad a un contratista. Final-

RICK BEVINGTON y ARTHUR H. ROSENFELD son expertos en edificios que han colaborado por primera vez para la confección de este artículo. Bevington es director nacional de ventas y mercados de Johnson Yokogawa, una empresa estadounidense-japonesa de reciente constitución. Antes dirigió el departamento de apoyo a las ventas en la división nacional de servicios para edificios de Johnson Controls en Milwaukee. Rosenfeld es profesor de física en la Universidad de California en Berkeley y director del Centro de Ciencias de la Construcción en el laboratorio Lawrence. Forma parte de un comité de la Academia Nacional de Ciencias encargado de valorar las consecuencias derivables del calentamiento debido al efecto de invernadero. Los autores agradecen la importante contribución de Laurie Burnham, del equipo editor de *Investigación y Ciencia*, en la preparación de este artículo.

mente, el edificio terminado se entrega a un equipo de mantenimiento y explotación, que apenas si ha sido consultado durante el proceso de diseño, pero probablemente conoce mejor el funcionamiento diario del edificio. En este proceso, se consideran más importantes los costes iniciales de construcción que los de operación a largo plazo.

Este sistema tiene que mejorarse. En el mercado inmobiliario, los compradores deben aprender a considerar los gastos energéticos en su decisión sobre una posible transacción y los constructores tienen que explotar el rendimiento energético como un argumento ventajoso que valoran los consumidores. En un edificio de servicios se debe prestar atención no sólo a su diseño, sino también a su forma de funcionamiento global. Como los gastos energéticos a lo largo de la vida del edificio vienen a equivaler a los costes iniciales de construcción, un aumento de sólo un pequeño porcentaje en su rendimiento energético se traduce en una notable cantidad de dinero.

El futuro de las medidas para el ahorro de energía es probablemente mayor entre el censo de edificios de servicios; aquí, los gastos energéticos absorben un 30 por ciento del presupuesto de funcionamiento. El rendimiento energético en los edificios dedicados a servicios está creciendo rápidamente. Esta tendencia se puede atribuir en parte a una nueva generación de compañías de servicios energéticos, que ofrecen su experiencia en diseño, instalación y mantenimiento a largo plazo de refinados sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (CVAA). Con una cuidadosa puesta a punto de los sistemas CVAA y los de alumbrado existentes (juntos, representan más de los dos tercios de las necesidades energéticas de un edificio), una compañía de servicios energéticos puede reducir los gastos de un edificio y, al mismo tiempo, aumentar su confort. El ahorro (o los gastos que se evitan) puede financiar proyectos de reacondicionamiento más amplios, como revisiones a fondo de equipo y sistemas operativos. Todo el mundo se beneficia a largo plazo: el propietario del edificio ahorra dinero, la compañía de servicios energéticos obtiene ganancias y se recorta el consumo sobre la producción global de energía.

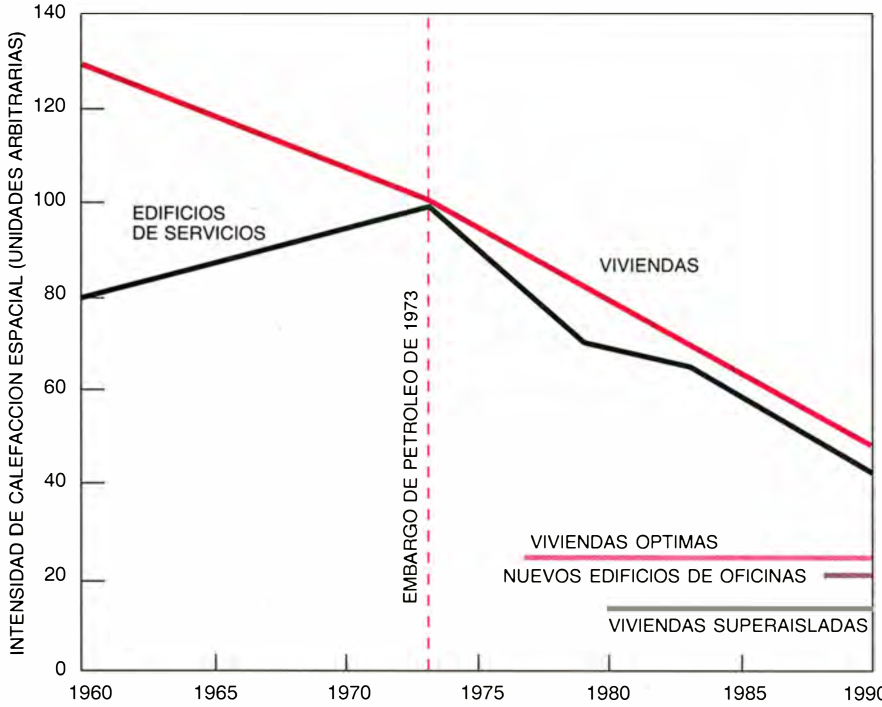
Debido a que uno de los autores (Bevington) trabaja en una compañía de servicios energéticos, Johnson Controls, hemos escogido el análisis de dos ejemplos con los que estamos familiarizados: el aeropuerto intercontinental de Houston, Texas, y el complejo del Centro de Gobierno en Boston, Massachusetts.

El aeropuerto de Houston solicitó a Johnson Controls que redujera los gastos de calefacción y refrigeración en las terminales de pasajeros sin disminuir los niveles de confort. Iniciando una rutina de mantenimiento (sustitución de filtros y limpieza de serpentines en el sistema de aire acondicionado) y programando el funcionamiento de los equipos de refrigeración (unidades de aire acondicionado) según la hora del día y la temperatura del aire en el exterior del edificio, los gastos energéticos en el aeropuerto se redujeron en un 20 por ciento, pasando de dos millones de dólares a 1,6 millones. Este ahorro se logró con sólo optimizar el funcionamiento de los sistemas existentes, sin ninguna inversión de capital.

Los reacondicionamientos a mayor escala sí suelen requerir inversiones de capital. En la mayoría de casos, la compañía de servicios energéticos proporciona los fondos necesarios y garantiza una determinada reducción en el consumo energético, pero espera recibir del 50 al 70 por ciento del ahorro logrado gracias al reacondicionamiento hasta su amortización. El Centro de Gobierno (un complejo de cuatro edificios de 210.000 metros cuadrados) contrató un reacondicionamiento, a gran escala y en múltiples etapas, de ventanas, alumbrado y sistema CVAA en sus dos edificios de 22 pisos. La sustitución de las ventanas tenía un precio prohibitivo; por eso, se las revistió con una película reflectante que amortiguara la radiación infrarroja (calor solar) que penetra en el edificio. Los elementos de alumbrado, que consumen el 30 por ciento de la electricidad en un edificio de servicios, se reacondicionaron con reflectores, reduciendo a la mitad el número de bombillas por elemento, pero manteniendo el nivel de iluminación.

Como parte del reacondicionamiento del sistema CVAA, los operarios de mantenimiento limpiaron y calibraron el sistema de aire e instalaron cuatro equipos de refrigeración de distintos tamaños. La ventaja de instalar equipos de distintos tamaños y capacidades de enfriamiento es obvia: no hay razón para que un equipo grande funcione los días templados derrochando energía.

El núcleo central de la mayoría de los reacondicionamientos de edificios



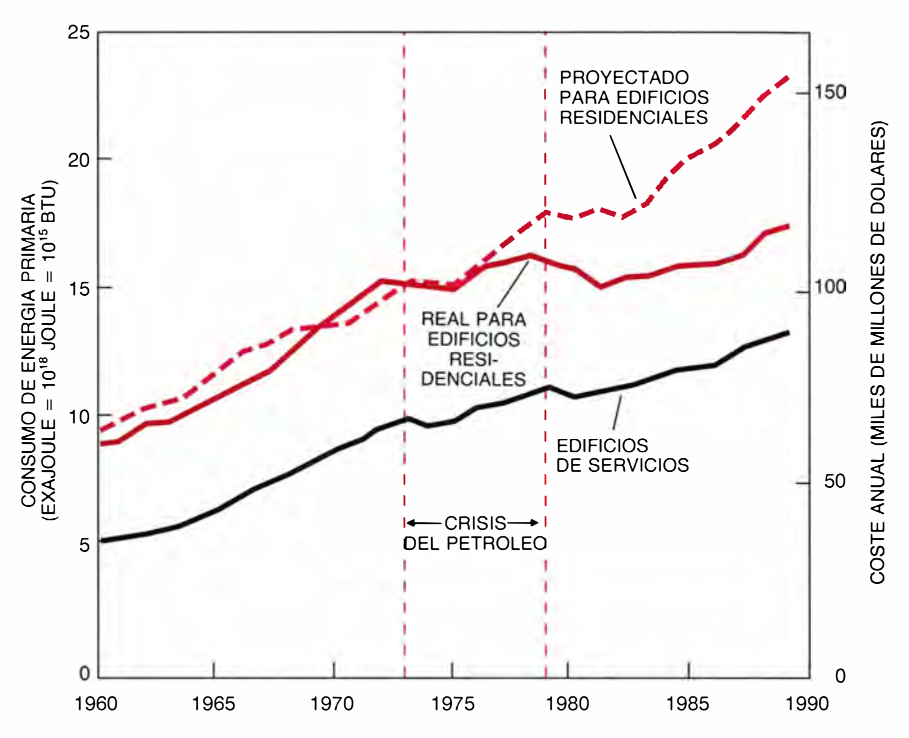
2. INTENSIDAD DE CALEFACCION ESPACIAL, cantidad de calor por unidad de superficie que se necesita para tener una temperatura interior confortable; ha disminuido casi un 50 por ciento en los edificios nuevos de los Estados Unidos. Semejante caída se ha conseguido gracias a las mejoras en el rendimiento energético impulsadas por el embargo de petróleo de 1973. A la cabeza de la revolución, se encuentran las "viviendas óptimas" con aislamiento (pero aún poseen calefacción por circulación forzada de aire), las oficinas que poseen ventanas con tecnología punta y revestimientos del edificio, amén de las viviendas superaisladas que ni siquiera necesitan calefacción central.

consiste en un sistema de control integrado basado en un microprocesador, que controla y hace funcionar los sistemas CVAA y de alumbrado. Los sensores, colocados en puntos estratégicos del edificio y a lo largo del sistema CVAA, suministran continuamente información al sistema de control. Los parámetros fijados para cada zona del edificio mantienen, por ejemplo la temperatura y la humedad, lo que permite un control exacto del clima en el interior del edificio. El sistema puede mantener selectivamente la sala de ordenadores a una temperatura menor que, por ejemplo, un almacén; también puede fijar el índice de ventilación y aumentar el flujo de aire en una zona de fumadores o en una cafetería.

Johnson Controls gastó más de 2,5 millones de dólares reacondicionando el complejo gubernamental e instalando el sistema de control por ordenador. El resultado es una disminución del gasto energético desde un promedio de seis millones de dólares anuales hasta 3,5 millones. Además, ambas partes se beneficiarán durante los diez años de duración del contrato. Johnson recupera la mitad del dinero ahorrado por la reducción de gastos en electricidad (alrededor de 1,2 millones de dólares anuales); el estado de Massachusetts puede gastar la otra mitad en lo que desee.

Muchas instalaciones escolares de los Estados Unidos han emprendido reacondicionamientos similares. Honeywell, compañía líder en sistemas de control, ha puesto en marcha un programa de modernización del alumbrado en 12 escuelas de Newark, Nueva Jersey. La instalación de tubos fluorescentes compactos de alto rendimiento redujo las necesidades de mantenimiento, dobló los niveles de iluminación y ahorró de un 15 a un 20 por ciento en electricidad. Según el acuerdo, Honeywell ha garantizado que Newark economizará más de 200.000 dólares anuales; las escuelas pagarán, así, el reacondicionamiento con el presupuesto actual de funcionamiento. Aunque el plazo de amortización es largo, unos cinco años, los edificios durarán 50 más.

En menor escala, un sistema de controles integrados instalado en un edificio de seis pisos del First National Bank en Huntsville, Texas, ha reducido los gastos anuales de energía en 30.000 dólares con una amortización en dos años y medio. En Overland Park, Kansas, otra instalación similar ha ahorrado al hospital Humana 98.000 dólares anuales, y la cantidad invertida también se amortizará en dos años y medio. En Houston, la red de bibliotecas públicas redujo sus facturas de electricidad en un 31 por ciento, ahorrando así 500.000 dólares anuales, con una amortización de tres años. El capital del que se dispone gracias a tales innovaciones puede destinarse a otras prioridades: contratación de profesores, formación de médicos y compra de libros.



3. INDICE DE CONSUMO DE ENERGIA PRIMARIA (en exajoule) en los edificios de los Estados Unidos, cuyo crecimiento se ha enlentecido desde 1973. Antes, el consumo de energía en viviendas y edificios aumentaba con un índice anual del 4,5 y 5,4 por ciento, respectivamente. Desde 1973 hasta 1986, se detuvo el crecimiento del consumo en el sector doméstico; en el sector de servicios no superó un 1,6 por ciento anual. La caída de los precios del petróleo en 1986, sin embargo, hizo que la curva de crecimiento se volviera a elevar con un índice anual de aproximadamente un 3,3 por ciento. La energía primaria en electricidad se refiere a la cantidad consumida en la central eléctrica.

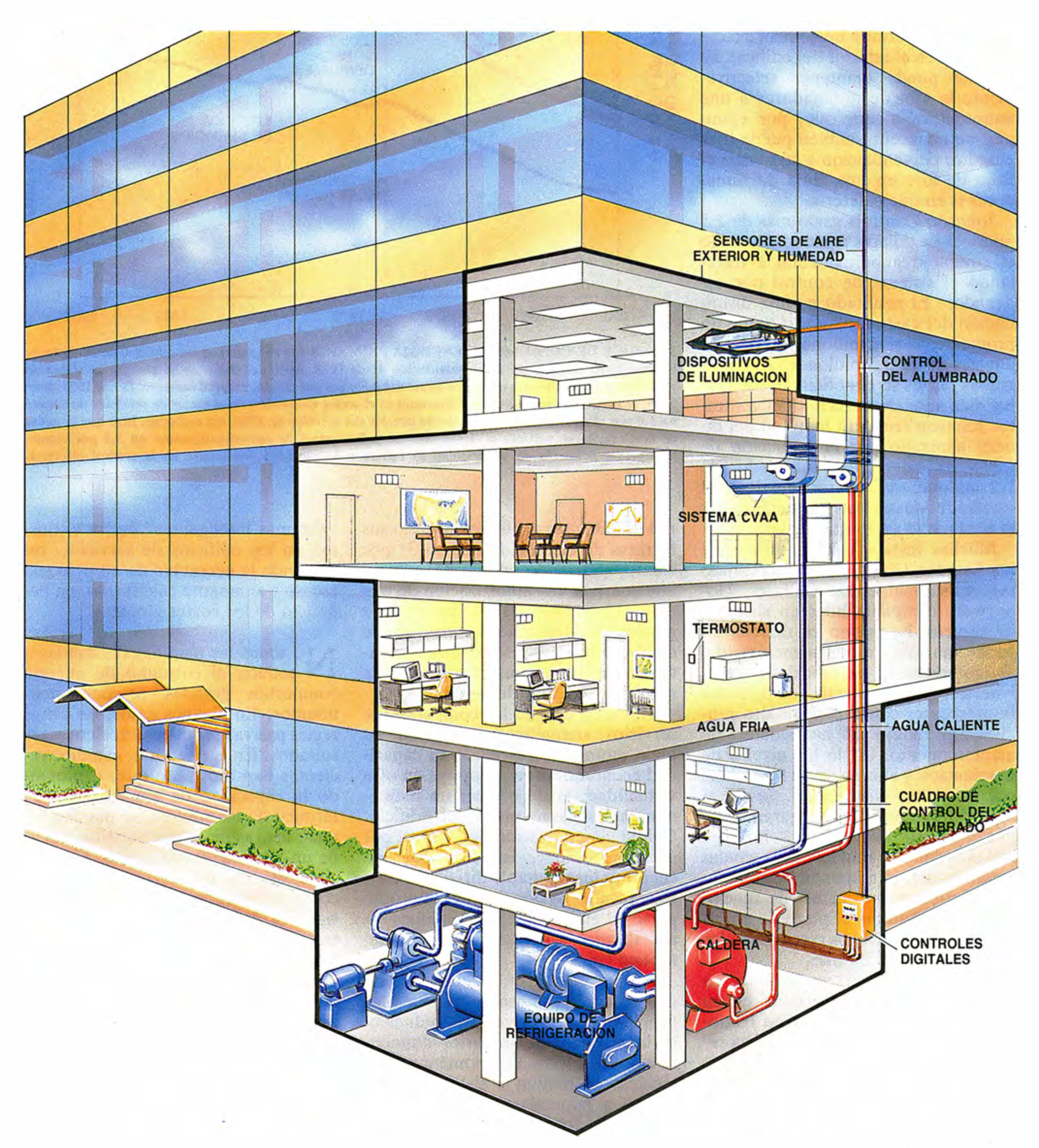
La razón de que las compañías de servicios energéticos atraviesen un buen momento trasciende su capacidad economizadora; se apoya en otra virtualidad, la de ofrecer un mantenimiento a largo plazo del edificio. Con la generalización del control por microprocesador, las empresas encuentran más rentable dirigirse a contratistas ajenos que formar su propio personal en el manejo de equipos especializados y herramientas de diagnóstico complejas.

Las posibilidades de autodiagnóstico acabarán por incorporarse en los propios sistemas de control, reduciendo la necesidad de operarios altamente especializados. De momento estas técnicas se limitan a sistemas autónomos a pequeña escala, como las máquinas fotocopiadoras. Cuando una de ellas se estropea, un panel visualizador revela la situación del fallo y sugiere el procedimiento de reparación paso a paso. Algún día, los "sistemas inteligentes" harán lo mismo en los edificios de servicios, reduciendo la necesidad de un personal escaso y altamente cualificado, en beneficio de los costes globales.

No todas las medidas destinadas a reducir el consumo de energía comportan grandes reacondicionamientos. En algunos casos, las estrategias pasivas producen excelentes resultados. En ese sentido, estudios recientes han mostrado que, explotando la capacidad de almacenamiento térmico de un edificio, se pueden reducir los gastos de aire acondicionado de un 30 a un 70 por ciento. El principio es sencillo: un edificio actúa como un sumidero de calor, lo que significa que almacena calor y, por tanto, tarda (como una gran catedral) mucho tiempo en alcanzar la misma temperatura que el aire que lo rodea. Así, en verano, es más rentable dejar que las temperaturas interiores aumenten gradualmente a lo largo de la tarde; al final de la jornada (cuando el edificio ya no está habitado), se apaga el equipo de refrigeración y se deja que las temperaturas interiores superen el límite de confort. Durante la noche, cuando el aire exterior es más fresco y la electricidad más barata, se enciende el equipo y se refri-

gera el edificio. Con un enfriamiento previo, pues, se reduce el funcionamiento del aire acondicionado durante el día, cuando las tarifas eléctricas son elevadas, y se ahorran gastos. Debido a que la frescura del edificio retrasa la acumulación de calor, no se pierde el confort interior.

Esta estrategia contradice la opinión asentada de refrigerar los edificios sólo cuando estén ocupados y sólo cuando sea absolutamente necesario. Aunque no precisa de una técnica refinada, la estrategia necesita un sistema de control con un algoritmo sencillo que pronostique la demanda energética del edificio con 24 horas de antelación. El ahorro varía a tenor de la tabla de tarifas de la compañía eléctrica local, los materiales del edificio y las prestaciones del sistema de refrigeración en diferentes condiciones de carga. Obviamente, cuanto mejor sea el aislamiento de la estructura, mejor se puede explotar la capacidad de almacenamiento térmico.



4. REACONDICIONANDO EDIFICIOS se aumenta el confort y se consume menos energía. Un reacondicionamiento a gran escala necesita generalmente la sustitución de los sistemas de alumbrado y CVAA y la instalación de controles automatizados. Los sensores colocados en diversos puntos suministran datos de temperatura y humedad al ordenador que controla el clima del edificio. En algunos casos, las ventanas están revestidas con una película reflectante, que reduce los gastos de refrigeración al disminuir la cantidad de radiación infrarroja que penetra en el edificio.

En Suecia, el almacenamiento térmico se utiliza durante el invierno. Todos los edificios nuevos de oficinas tienen un buen aislamiento y almacenan calor "libre": el que generan personas, alumbrado, equipo de oficina y luz solar. Mientras la mayoría de los edificios de oficinas en los Estados Unidos tiene paredes finas que se enfrían rápidamente en una noche de invierno, en Suecia el buen aislamiento de las oficinas almacena calor libre día y noche. Al conservar este calor en paredes, suelos y techos, el edificio se convierte casi en autosuficiente, con lo cual no necesita un sistema de calefacción central.

La utilización de la potencia del sol para iluminar el interior de los edificios constituye otra técnica pasiva, habitual en Europa, que tiene mucho camino por recorrer en los Estados Unidos. El hecho de que la luz solar directa que atraviesa un metro cuadrado de una ventana transparente pueda iluminar 200 metros cuadrados de espacio en planta (si estuvieran uniformemente distribuidos) indica el potencial de la iluminación de interiores sin electricidad.

La luz solar ambiental, sin embargo, es muy variable; la intensidad que incide sobre una ventana puede variar en un factor de 20 dependiendo del tiempo atmosférico, hora del día, estación, etc. Una ventana diseñada para cumplir con los requisitos de un día nublado deja pasar demasiada luz, luminosidad y calor cuando hace sol. Por contra, una ventana diseñada para apantallar las intensidades máximas de luz solar, deja pasar insuficiente luz durante el resto del año.

Otras estrategias pueden reducir notablemente las necesidades de alumbrado eléctrico de un edificio. Sombras interiores o persianas equipadas con sensores fotosensibles pueden ajustarse automáticamente por sí mismas, según la cantidad y la dirección de la luz que entra por la ventana. Sombras exteriores realizan una función similar dirigiendo y difundiendo la luz antes de que incida sobre la cara exterior de la ventana. Por otra parte, las ventanas pueden equiparse con reflectores y otros dispositivos ópticos que dirijan la luz hacia los rincones de una habitación.





5. COMPARACION DE DOS TECNICAS de fabricación de ventanas. Las superventanas (*panel derecho en la ilustración de la izquierda*), que están calificadas como R-9, alcanzan la transparencia de las ventanas R-4 de doble hoja de baja-E (*panel izquierdo de la misma ilustración*), pero retienen más calor durante el invierno, según muestra la imagen infrarroja. La doble hoja de vidrio produce una imagen azul, lo que indica pérdida de calor, mientras que la superventana produce una imagen amarilla, prueba de que retiene el calor casi con la misma eficacia que lo haría una pared R-50.

En los últimos años, ingenieros y fabricantes han avanzado bastante en el diseño de las ventanas. No son, por lo común, buenos aislantes: pierden calor hacia el exterior en invierno y dejan pasar excesiva radiación solar dentro del edificio durante el verano. De ahí que les corresponda el 25 por ciento de las necesidades de calefacción y refrigeración en los Estados Unidos. El consumo de energía por culpa de las ventanas equivale a la que se obtiene con el petróleo que fluye anualmente a través del oleoducto de Alaska.

En un principio, las ventanas se fabricaban con una sola hoja de vidrio. Aunque éste sea transparente e impida el paso de las corrientes de aire, constituye tan mal aislante casi como el metal y posee una alta emisividad: absorbe y emite calor fácilmente en forma de radiación infrarroja. En un día frío, las ventanas de un solo vidrio están casi tan frías como el ambiente exterior y, por tanto, el valor de su resistencia térmica es aproximadamente R-1.

Después de la segunda guerra mundial, comenzaron a crearse ventanas de doble hoja de vidrio: los termocristales o ventanas de vidrio aislante. Constan de dos hojas de vidrio separadas por un intervalo de aire de seis milímetros y su valor de resistencia térmica es R-2, lo que significa que son dos veces más resistentes a la pérdida de calor que las ventanas de una sola hoja. Mucho más reciente es la aplicación de un revestimiento de baja emisividad (baja-E) a la superficie interior del vidrio que está en contacto con el espacio de aire encerrado entre ambas hojas. La película de baja-E refleja el calor radiado hacia el interior del edificio, en vez de transmitirlo al exterior. Estas ventanas están clasificadas como R-3. Añadiendo una segunda película de baja-E y sustituyendo el aire entre las hojas por distintos gases, se consigue un ahorro de energía aún mayor. Por ejemplo, el argón, que no es tóxico, mejora las propiedades térmicas de una ventana R-3 en un 25 por ciento. Al estar clasificada como R-4, una ventana de argón de baja-E tiene un valor de aislamiento doble que el de una ventana tradicional de doble hoja.

La construcción de una factoría de tamaño medio dedicada al revestimiento de baja-E cuesta cinco millones de dólares; ahora bien, las ventanas producidas diariamente ahorrarían 10.000 barriles de petróleo, cantidad equivalente a una plataforma de perforación en alta mar con una producción de 10.000 barriles diarios, cuya construcción cuesta cien veces más, es decir, 500 millones de dólares. Aunque actualmente los principales fabricantes de ventanas norteamericanos sólo producen ventanas de baja-E, éstas son todavía desconocidas en Europa oriental, la Unión Soviética y China. Nuestra recomendación para estos países (y al Banco Mundial) es que inviertan en fábricas de revestimientos; la aportación inicial es mínima y, a largo plazo, se obtienen sustanciales beneficios financieros y ambientales.

¿Cuánto más se puede elevar el rendimiento térmico de una ventana? Aunque parezca sorprendente, la década de los ochenta ha dado lugar a una nueva generación de superventanas. Creando el vacío entre las dos hojas de una ventana de baja-E o llenando ese intervalo con un material transparente aunque no conductor (como un aerogel, aislante de alta tecnología), se obtienen valores de resistencia térmica que van de un R-6 hasta un R-10. Un prototipo que se está desarrollando actualmente ha conseguido mejores resultados, en promedio diario, en pruebas experimentales

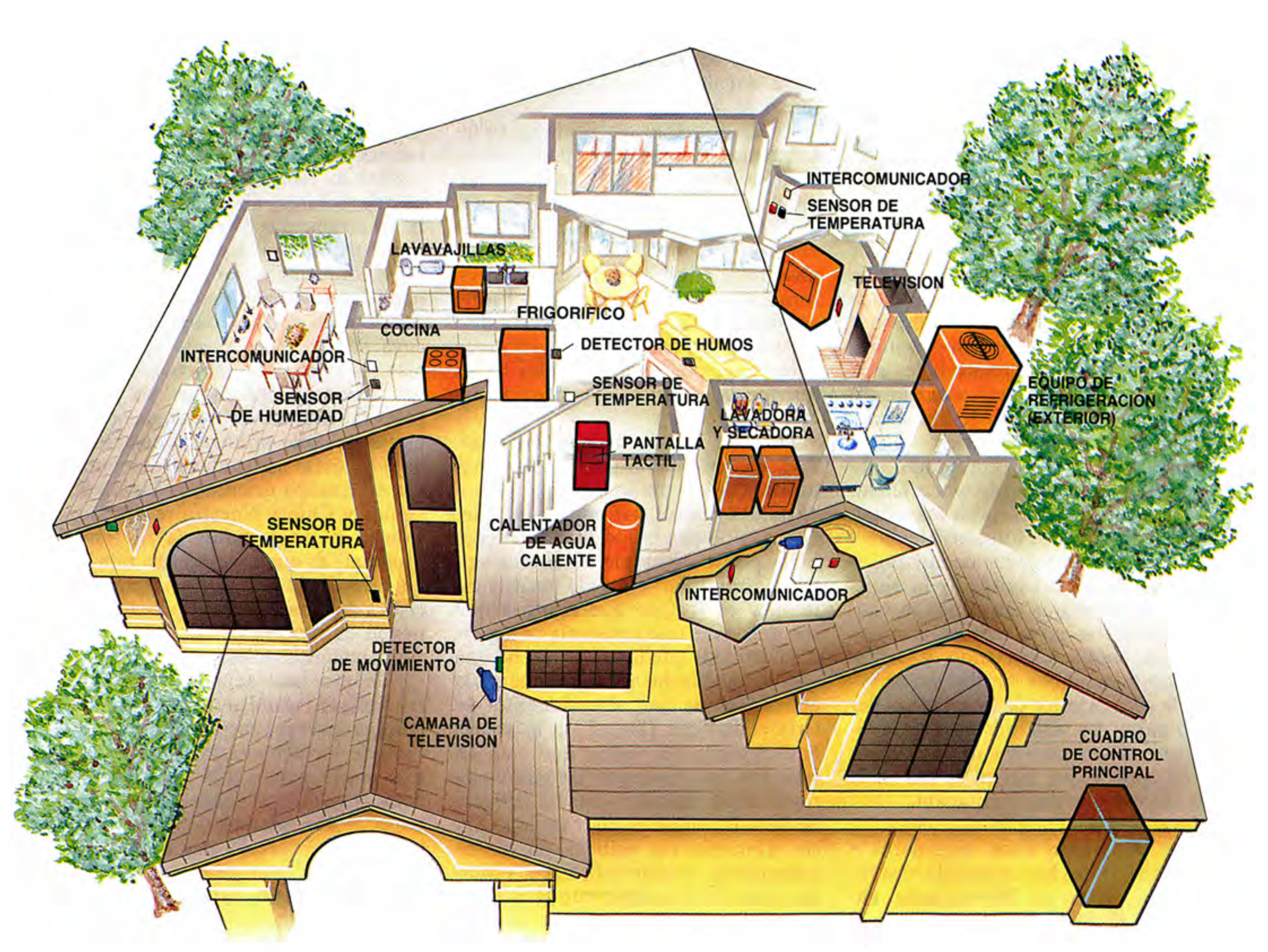
que una pared con gran aislamiento (R-19). Por la noche, una superventana pierde un poco más de energía que una pared R-19, pero, durante el día, basta incluso con una cantidad mínima de luz solar para convertir la ventana en un suministrador neto de energía. En otras palabras, las superventanas ganan calor, mientras que la pared que las rodea sólo evitan su pérdida.

Las superventanas pueden costar de un 20 a un 50 por ciento más que las convencionales, pero su plazo de amortización (calculado en términos de ahorro energético) es de dos a cuatro años. Ofrecen también otras ventajas. Se oponen a la condensación, impiden el paso de los rayos ultravioleta que hacen perder el color al mobiliario y proporcionan mayor confort térmico.

En los climas cálidos, el problema es la ganancia de calor, más que su pérdida. Como todo el mundo sabe, la penetración de abundante luz solar a través de una ventana eleva la temperatura interior, lo que crea una carga tremenda para la refrigeración. Hay ya revestimientos avanzados de ventanas que solucionan el problema. Estas películas impiden selectivamente el paso de la radiación solar, aunque dejan que la luz entre en la habitación, con lo que disminuye la necesidad de alumbrado artificial y aire acondicionado. Existen ventanas electrónicas y fotosensibles en fase todavía de investigación y desarrollo; cuando la luz solar es demasiado intensa, automáticamente la reflejan o absorben.

Se han hecho grandes avances en el mercado inmobiliario, en el que las técnicas basadas en el control por microprocesador han dado lugar a las "viviendas inteligentes". Estos edificios se hallan equipados con sistemas de control automatizado, comparables con los sistemas de control integrado instalados en los edificios de servicios. De hecho, varios fabricantes, empresas y asociaciones comerciales, incluyendo el Instituto de Investigación de la Energía Eléctrica (IIEE o EPRI) y la Asociación estadounidense de Empresarios de la Construcción, han constituido recientemente un consorcio para la promoción de viviendas inteligentes. Aunque el objetivo primario de esos habitáculos sea facilitar a sus ocupantes el máximo confort a un precio razonable, muchas de esas viviendas incorporan tecnologías para un mejor rendimiento energético.

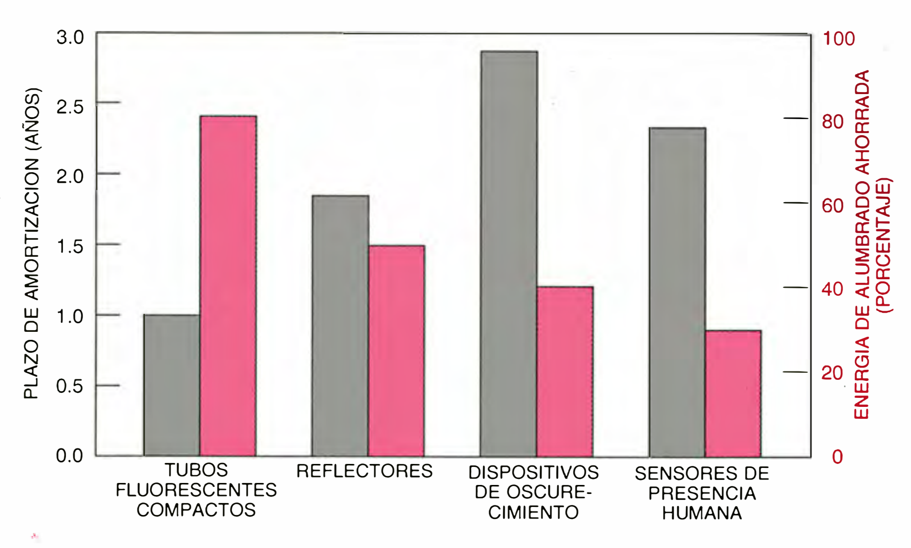
En ese contexto, la Southern California Edison Company ha lanzado un proyecto piloto de vivienda del futuro en cooperación con constructores locales. Cada unidad está equi-



6. "VIVIENDAS INTELIGENTES". Ofrecen un mayor confort a un precio razonable y tienen un rendimiento energético mucho mayor que las normales. En el centro de la casa hay un cuadro de control automatizado que supervisa los sistemas de calefacción, aire acondicionado, alumbrado y seguridad. En las viviendas más avanzadas, el usuario puede ajustar la temperatura y la humedad y apagar y encender los electrodomésticos tocando una pantalla instalada en la pared. También ahorran las medidas pasivas que mitigan el calor del sol, entre las que se encuentran paredes aisladas, tejados que reflejan la radiación solar y árboles de sombra (especialmente en las caras sur y oeste del edificio) que protegen del sol.

pada con un sistema de automatización con pantalla táctil que controla la calefacción y el aire acondicionado, el alumbrado y el sistema de seguridad. Simplemente tocando la pantalla, el propietario puede fijar los niveles de temperatura y humedad en cualquier habitación de la casa. Estas viviendas están también equipadas con medios diversos para el ahorro energético: tubos fluorescentes compactos, sensores de presencia humana (apagan automáticamente la luz cuando una habitación se queda vacía en un intervalo de cinco a siete minutos) y electrodomésticos con buen rendimiento energético, que se pueden programar para que funcionen durante la noche, cuando la demanda de electricidad es baja.

Algunos constructores ofrecen ya "viviendas óptimas", cuya construcción puede ser más cara, teniendo plazos de amortización de cinco a siete años, pero sus gastos de funcionamiento son mucho menores a largo plazo. Normalmente, estas viviendas tienen 15 centímetros de aislamiento en sus paredes, frente a los nueve centímetros de las viviendas normales, y un revestimiento exterior de aislamiento, lo que confiere a la pared un valor total de resistencia térmica de R-24. (El valor convencional es de R-11.) Las ventanas son de doble o triple hoja de vidrio con baja-E, y las corrientes de aire se controlan mediante ventiladores mecánicos de extracción, en vez de confiar en el viento, lo que permite una calidad de aire mejor y más uniforme en el interior de la vivienda.



7. REACONDICIONAMIENTO DEL ALUMBRADO para reducir los gastos de electricidad (*rosa*). Los cambios necesarios son bastante baratos, con un plazo de amortización de sólo uno a tres años (*gris*). Los datos de Johnson Controls muestran que los tubos fluorescentes compactos de 18 watt (que suministran la misma luz que una bombilla de filamento incandescente de 75 watt) pueden reducir los gastos de alumbrado en un 80 por ciento. Los reflectores reorientan la luz, permitiendo la supresión de la mitad de las bombillas, pero manteniendo los niveles de iluminación. Los dispositivos de oscurecimiento ajustan las luces según la luz solar ambiente. Los sensores de presencia humana apagan las luces cuando se deja vacía una habitación durante más de cinco minutos.

Otra innovación consiste en un calentador de agua que también actúa como calefactor. Desviando el agua caliente hacia pequeñas unidades de calefacción, los constructores de viviendas superaisladas pueden ahorrar de 1000 a 2500 dólares (la cantidad que se gasta normalmente en un sistema central de calefacción y ventilación) y así invertir en un mayor aislamiento. Incluso en una fría noche de Chicago, cuando la temperatura puede descender hasta 25 grados bajo cero, la vivienda superaislada se mantiene caliente gracias a su calentador de agua. Aunque escasas todavía en los Estados Unidos, estas viviendas ya son normales en Escandinavia, donde se montan prefabricadas en las factorías y se envían en piezas del tamaño de un camión hasta su lugar de destino.

Las viviendas óptimas y superaisladas "se venden" bien. Ofrecen tal rendimiento energético, que una constructora de Chicago, Bigelow Group, garantiza sus bajos costes de funcionamiento. Si el gasto anual de calefacción de una vivienda urbana supera los cien dólares (doscientos en el caso de una vivienda unifamiliar), la constructora pagará la diferencia. Además, Bigelow organiza cada año un concurso para ver quién posee el recibo de calefacción más bajo; el ganador del año pasado tuvo una factura anual de calefacción de sólo 24 dólares, lo cual no está nada mal dada la dureza de los inviernos de Chicago.

Las viviendas, al igual que los edificios de servicios, se convierten en un objeto ideal para la aplicación de las medidas pasivas de conservación de energía. Una de las estrategias más sencillas y antiguas, y de las más eficaces también, para reducir la ganancia de calor de una vivienda durante el verano consiste en mitigar la acción del sol plantando arbustos y pintando la casa de un color reflectante. En una tarde calurosa (30 grados C), una zona sin sombra de una vivienda consume de dos a cinco kilowatt de potencia para refrigeración, mientras que una casa con buena sombra y pintada de blanco consume un kilowatt menos durante el mismo período.

Además, la mayoría de las grandes ciudades de los Estados Unidos se han convertido en "islas de calor" durante el verano. En Los Angeles, las temperaturas en el centro de la ciudad han subido tres grados desde 1940, y aumentan medio grado cada diez años al generalizarse el asfalto por las calles de la ciudad. El asfalto, además de tener un color oscuro y absorber calor, sustituye a los árboles, con lo que se reduce el enfriamiento por evapotranspiración. Las estrategias pasivas como la plantación de árboles de sombra y el blanqueado de edificios y asfalto pueden invertir el efecto de isla de calor de Los Angeles, que cuesta actualmente 100.000 dólares adicionales y añade cada hora 1000 toneladas de CO_2 a la atmósfera. Estas medidas ejercen, por tanto, un efecto positivo sobre el medio ambiente evitando que una cantidad muy importante de dióxido de carbono llegue a la atmósfera.

Es evidente que nunca hubo tantas posibilidades para reducir el consumo de energía en los edificios, ni su necesidad fue tan acuciante. La creciente preocupación por el medio ambiente y la competitividad industrial han facilitado poderosos incentivos para adoptar la amplia gama de nuevas técnicas hoy a nuestro alcance. A pesar de todo, se ha hecho más lento el ritmo de progreso logrado desde 1973 hasta 1986. ¿De qué forma se puede reavivar el interés por el rendimiento energético? ¿Cuáles son las medidas más probables que obliguen a que la curva adquiera su tendencia ascendente?

La estrategia más práctica, al menos en los Estados Unidos, consiste en imponer normas nacionales para edificios y electrodomésticos, acompañadas con incentivos para cumplirlas. Actualmente, la Sociedad Norteamericana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acon-

dicionado (ANICRA) emite regularmente normas de adopción voluntarias, manteniéndolas en valores con los que se obtenga un plazo de amortización de aproximadamente tres años. Aunque las normas de la serie 90 se han adoptado en la mayoría de los estados, no se cumplen como debiera. El resultado es que la mayoría de los nuevos edificios y viviendas tienen un bajo rendimiento energético, como corresponde a amortizaciones de sólo dos o tres años. Aunque parezca mentira, el gobierno federal ha adoptado normas para sus propios edificios más duras que las enunciadas por ANICRA que, sin embargo, no suele cumplir, y pocas veces se instalan ventanas, sistemas de alumbrado de alto rendimiento u otras innovaciones para reducir gastos. Tampoco se hace hincapié en la puesta a punto y el mantenimiento de los equipos.

Algunos estados, especialmente los de la costa oeste, establecen normas más estrictas que obligan a cumplir con rigor y, por tanto, están dispuestos a aceptar amortizaciones ligeramente más largas, de tres a cuatro años. Normas similares son frecuentes en Europa occidental.

El estado de Massachusetts está estudiando una estrategia efectiva para los edificios nuevos. Se prepara una proposición de ley que fija un sistema de "cuotas con descuento" para los edificios de servicios de más de 4500 metros cuadrados. Los edificios que tengan previsto un consumo de electricidad superior a un valor medio serán penalizados con una fuerte tarifa de enganche a la red por parte de las compañías eléctricas. En cambio, aquellos que estén diseñados para consumir menos electricidad que el valor medio obtienen un descuento. El sistema se denomina de beneficios neutros porque las cuotas recogidas de los edificios despilfarradores se descuentan a los que consumen poca electricidad. Sólo una pequeña parte se destina a gastos administrativos y a la compañía eléctrica para promoción de medidas de ahorro.

Debe intensificarse la investigación dedicada a la eficiencia energética de los edificios. El sector de la construcción está maniatado por sí mismo; dominado por miles de pequeñas empresas, se halla demasiado fragmentado para sostener el tipo de investigación realizada en el sector industrial o de transportes. El peso recae entonces sobre el gobierno y las empresas eléctricas. A pesar de todo, entre ambas gastan sólo aproximadamente 200 millones de dólares anuales, o un 0,1 por ciento del gasto anual en electricidad de edificios, que es de 200.000 millones de dólares. La cantidad invertida es insuficiente a todas luces. Incluso industrias bien establecidas, como la siderúrgica, automovilística y química, asignan aproximadamente un uno por ciento de sus beneficios a la investigación y desarrollo de sus productos, que es una cantidad diez veces mayor que la que gasta el sector de la construcción.

Por mor de comparación, Suecia ha constituido un Consejo Nacional de Investigación de la Construcción con un presupuesto anual de mil millones de dólares (cantidad convertida en términos de la economía estadounidense, que es treinta veces mayor que la sueca). No es sorprendente que los resultados de este programa hayan sido impresionantes. Suecia está hoy a la cabeza mundial, con el mayor porcentaje de edificios con rendimiento energético, y exporta la mayor parte de su tecnología de construcción a todo el mundo. De hecho, cuando se compara al mismo nivel que el de los Estados Unidos, su sector de la construcción alcanza un superávit comercial anual de 60.000 millones de dólares, mientras que este mismo sector en los Estados Unidos soporta un déficit comercial anual de 6000 millones de dólares.

El futuro, aunque no es ni mucho menos seguro, parece prometedor. La gran abundancia de tecnologías disponibles ha creado un potencial verdaderamente inmenso para el ahorro de energía en todas las clases de edificios. Los edificios de servicios que hoy consumen anualmente un promedio de 160 kilowatt-hora por metro cuadrado serán eliminados del mercado. En su lugar surgirán edificios que consuman menos de 55 kilowatt-hora por metro cuadrado. El paso de uno a otro no es sólo una cuestión de tiempo; necesita nuestro más firme empeño.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

REDUCING ENERGY COSTS AND PEAK ELECTRICAL DEMAND THROUGH OPTIMAL CONTROL OF BUILDING THERMAL STORAGE. J.E. Braun. ANICRA Transactions, vol. 96, 2ª parte, 1990.

ENERGY-EFFICIENT BUILDINGS IN A WARMING WORLD. Arthur Rosenfeld en *Energy and the Environment in the 21st Century*. Dirigido por Jefferson Tesswter. MIT Press (en prensa).

REVENUE-NEUTRAL INCENTIVES FOR EFFICIENCY AND ENVIRONMENTAL QUALITY. Jonathan Koomey y Arthur Rosenfeld en *Contemporary Policy Issues* (en prensa).

Ciencia y sociedad

Extraños invitados

Hay amistades interesadas. Por ejemplo, la de hormigas y orugas. Por lo general las orugas ofrecen a las hormigas una secreción rica en azúcar y aminoácidos, que éstas comen. A cambio, las hormigas se abstienen de comerse a las orugas, e incluso las protegen de las avispas y otros depredadores.

Los entomólogos han observado hormigas y orugas implicadas en esta rara alianza en todo el mundo. Los investigadores también han sospechado que algunas orugas "atraen" a las hormigas. Pero, ¿de qué modo, exactamente? Philip J. DeVries, un entomólogo de la Universidad de Texas en Austin, ha dado respuesta a esta pregunta, al menos en el caso de las orugas de la especie *Thisbe irenea*.

La oruga, que se metamorfosea en una pequeña mariposa parda y blanca con una ornamentación azul iridiscente en sus alas inferiores, posee un par de órganos en forma de varillas crestadas situados inmediatamente detrás de la cabeza. La oruga hace sonar estos órganos diminutos, denominados papilas, rascando contra ellos la cabeza llena de protuberancias, según DeVries.

Las papilas generan un gorjeo rítmico, de tono alto, que es demasiado sutil para ser oído por el ser humano; las hormigas captan el mensaje en vibraciones que se transmiten a través del suelo o de las hojas. DeVries pudo registrar el sonido manteniendo un micrófono contra el suelo; las papilas le recuerdan un instrumento de percusión iberoamericano, el güeiro, una calabaza rodeada de surcos que se toca rascando longitudinalmente con un palillo.



1. Curiosa alianza entre hormigas y orugas.

Denominación de origen

En el laboratorio de Edward Anders en la Universidad de Chicago está prohibido estornudar. Al menos, mientras se examinan los granos de polvo procedentes de allende el sistema solar. En 1987, Anders y su equipo encontraron los primeros granos extrasolares, diminutos diamantes incrustados en meteoritos carbonáceos primitivos. Más tarde, con Ernst Zinner y sus colegas de la Universidad de Washington en Saint Louis, descubrieron granos de carburo de silicio y, en mayo del año en curso, identificaron granos de grafito.

Se cree que la antigüedad de los tres tipos de granos de carbono supera, en varios millones de años, la edad del sistema solar. Se trata, además, de los únicos compuestos conocidos que portan recuerdos de su lugar de origen, en este caso, novas o gigantes rojas ricas en carbono. Los granos de carbono contienen, también, isótopos de gases nobles creados en el interior de tales estrellas. Los granos y los isótopos constituyen una muestra de los procesos del interior de las estrellas y de las regiones próximas a ellas. Por contra, la materia del sistema solar, fundida, vaporizada y homogeneizada, carece de semejante registro.

Sabiendo las proporciones relativas en los meteoritos de granos de diamante, de carburo de silicio y de grafito, los científicos pueden adquirir un mejor conocimiento de las reacciones químicas que se desarrollan en las atmósferas estelares. Por ejemplo, aun cuando el diamante sea termodinámicamente menos estable que el grafito, se nos ofrece entre 100 y 200 veces más abundante en los meteoritos. Según Anders, la relativa profusión de diamantes abona su probable formación a través del mismo proceso químico de deposición de vapor con que se producen en el laboratorio. Por desgracia, no se pueden estudiar los diamantes uno por uno. Formados por unos 1000 átomos, miden unos 0,0015 micrometros. Anders bromea acerca de su tamaño sugiriendo utilizarlos para los anillos de compromiso entre las bacterias.

Sin embargo, los granos de carburo de silicio son mayores (llegan a medir 12 micrometros) y pueden analizarse para determinar si proceden de las novas o de gigantes rojas. Zinner y sus colegas han establecido ya que algunos de estos granos se originaron en cuatro gigantes rojas diferentes. Como los granos se habrían descompuesto con rapidez en el espacio abierto, se formaron quizás a un año luz del sistema solar.

El descubrimiento de los granos de grafito (de uno a seis micrometros de diámetro) muestra que éste nació de la condensación de la materia emitida por las gigantes rojas o las novas. Además, las pequeñas cantidades de grafito por muestra —sólo lo es una parte en 10.000— prueban que la mayor parte del carbono del universo no está en forma de grafito, como suele opinarse.

De acuerdo con el cuadro pintado por Anders, las gigantes rojas o las novas emitieron material que se condensó formando granos que, antes de llegar al sistema solar coalescente, viajaron varios millones de años por el espacio interestelar. Algunos terminaron por incrustarse en los meteoritos que encontraron en su camino; éstos llegaron a la Tierra y, por último, a los laboratorios. Robert Walker y sus colegas de la Universidad de Washington están utilizando técnicas

in situ para averiguar de qué manera se empotraron en los meteoritos y si existen otras clases de granos.

Aunque muchas teorías sugieren cómo empezó el sistema solar, el estudio de los granos podría apuntalar la idea de que los flujos emitidos por una fuente cercana, quizás una gigante roja o una nova, alumbraron dicho origen. La cuestión, levantada por el análisis del polvo, tardará tiempo en aclararse.



2. *Intersección de fallas en Venus.*

Venus, sin velo

Las nítidas imágenes de Venus enviadas por la sonda espacial *Magallanes*, recogidas en medio de bruscas interrupciones del contacto de radio, nos ofrecen un terreno escarpado, con marchamo de vulcanismo. No otra cosa cabría esperar de la diosa romana del amor, esposa de Vulcano, dios del fuego y la fragua.

Estas primeras imágenes de radar, resultado de una órbita y media de rastreo, se tomaron para someter a prueba el equipo de *Magallanes*. La figura 2 muestra la intersección de fallas en una zona de 20 kilómetros de ancho por 80 de largo, que en fotografías anteriores desde la Tierra aparecían como manchas borrosas. En la figura 3, de tamaño comparable y cercana a la anterior, distinguimos con claridad una línea de fractura.

Segun Ellen Stofan, geóloga del Laboratorio de Propulsión a Chorro de Pasadena, California, "se trata de una pendiente extensional, causada, a buen seguro, por la presión ascensional del volcán y de la región de su entorno. Lo que ignorábamos era la magnitud de la fractura en los llanos de lava que rodean la falla, señal de que hubo una profunda deformación provocada por los esfuerzos de tensión". Stofan explica que una de las misiones de la sonda *Magallanes* es la de determinar si los volcanes configuran todavía la corteza del planeta o si el calor interior se disipa por el movimiento y la subducción de placas tectónicas rígidas.

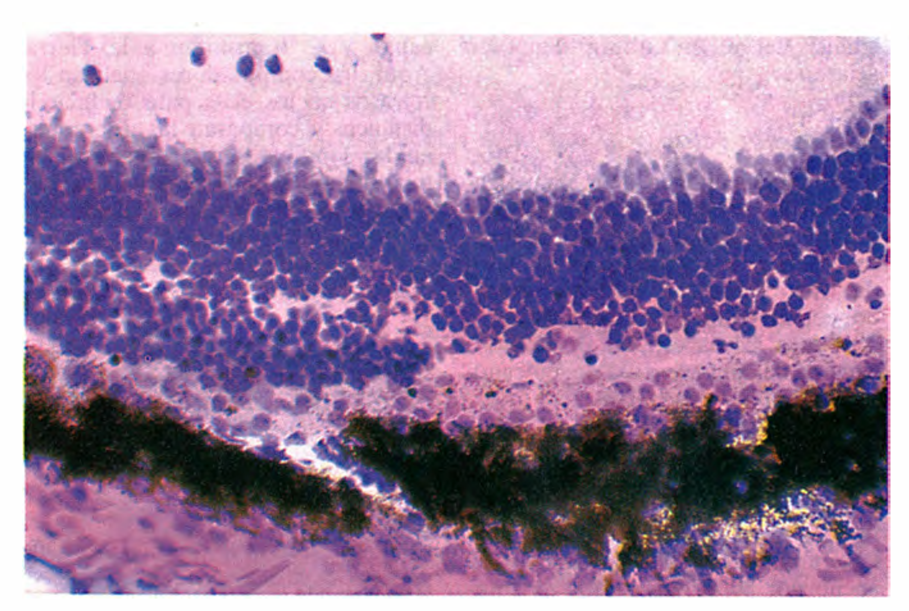
De acuerdo con lo previsto, se necesitan unas 1200 órbitas, 243 días terrestres, es decir, una rotación de Venus. La sonda *Magallanes* utiliza un sistema de radar oblicuo que le permite escudriñar a través de la segunda capa de nubes que oculta la superficie del planeta. El radar detecta formaciones de 120 metros de lado, resolución 10 veces mejor que la de las sondas soviéticas *Venera*, que hace siete años incorporaban sistemas menos avanzados.

El sistema, que se conoce por radar de apertura sintética, aprovecha el movimiento de la nave para simular un poder de resolución de una antena mucho mayor (o apertura, en argot de telescopio). La sonda envía un haz de microondas hacia abajo y hacia un lado, barriendo una franja de terreno de unos 20 kilómetros de anchura. Las señales reflejadas se registran en varios puntos de la órbita, se almacenan y se transmiten a la Tierra. Aquí, los computadores analizan los retrasos en los ecos para deducir la distancia y comparan las diferencias en las longitudes de onda causadas por el movimiento relativo entre el radar y su blanco. Estos cálculos generan imágenes bidimensionales.

A diferencia de otros ingenios de órbita terrestre, como el *Explorador*



3. *Línea de fractura en pendiente.*



4. Fotorreceptores que sobrevivieron a un trasplante en la retina de un ratón cuyas células detectoras de luz se habían degenerado. El injerto (media capa de puntos púrpura) *se colocó en su posición normal, entre el resto de retina* (capa entera de color púrpura) *y el epitelio pigmentado de la retina* (negro). *Foto de Martin Silverman.*

de radiación cósmica de fondo y el *Telescopio espacial Hubble*, la sonda *Magallanes* posee un único instrumento científico que cumple tres tareas. Saca imágenes del terreno, mide la altura del relieve y registra las emisiones térmicas de la superficie del planeta. La antena principal de *Magallanes* lo mismo cartografía que transmite información al laboratorio de Pasadena, por cuya razón se producen periódicas interrupciones en el levantamiento de los mapas.

¿Verán los ciegos?

Investigadores de la Universidad de Washington en Saint Louis han creado una técnica de trasplante retiniano que restablece, al menos en parte, la comunicación entre el ojo y el cerebro de animales cuya ceguera se produjo por pérdida de los bastoncillos y de los conos de la retina, las células que detectan la luz en el ojo. El hito ha arrojado un rayo de esperanza entre las personas que viven con los fotorreceptores dañados. Y son millones.

Pero los cirujanos no se atreven todavía a afinar sus escalpelos. Los datos son prematuros y nadie sabe si los trasplantes pueden verdaderamente restablecer la capacidad de percibir luz o de ver imágenes.

Martin S. Silverman y Stephen E. Hughes, de la Universidad de Washington, sustituyen fotorreceptores dañados con una capa de receptores sanos extraídos intactos de la retina de un donante. El injerto se obtiene pegando la retina a un bloque de gelatina para ir rebanándolo luego en capas hasta dejarlo en una capa fina, como de papel de fumar, de fotorreceptores. El gel se disuelve una vez el trasplante se inserta en su posición normal en el ojo.

Los investigadores mantienen intacta la capa original de células porque suponen que su ordenación importa tanto para la percepción de las imágenes como la propia presencia de los fotorreceptores. Estas neuronas especializadas convierten luz en impulsos eléctricos, que, en la retina, se transmiten a otras neuronas que, a su vez, envían las señales al cerebro.

A finales de 1989 Silverman y Hughes habían demostrado en roedores que las células trasplantadas sobrevivían en el ojo. Comprobaron también que las células transmitían información acerca de la luz que recibían a otras partes de la retina.

Aunque los investigadores carecen de datos sobre la discriminación de pautas en los receptores, reseñan que los experimentos con animales ponen de manifiesto el cumplimiento de ciertos requisitos previos para que tal discriminación se dé. Por ejemplo, en la retina las células injertadas forman sinapsis, o conexiones, con las neuronas pertinentes. De no producirse la sinapsis, cualquier señal emitida por las células habría pecado de imprecisión en el mejor de los casos.

Señalan también que, después del trasplante de los fotorreceptores, las pupilas del ojo responden cerrándose bajo la acción de la luz y dilatándose en la oscuridad. En su opinión, ello significa que las señales del injerto arriban al cerebro. Naturalmente, la respuesta de la pupila es reflexiva y no indica si las señales transducidas llegan a la corteza cerebral, donde se interpretan las imágenes. Otros experimentos realizados por el mismo equipo muestran que las neuronas de la corteza se excitan en respuesta ante el estímulo de los destellos luminosos.

Para determinar la posibilidad de una parcial recuperación de la agudeza visual, Silverman y Hughes proyectan estudiar la discriminación de formas en los primates. Como primer paso, junto con Henry J. Kaplan, de la misma universidad, han adaptado su técnica para aplicarla a los macacos, cuyo sistema visual se parece bastante al de los humanos.

Esperan que su técnica permita al menos restablecer algo la capacidad de discernir formas en personas ciegas, aunque se dan cuenta de que para la mayoría de ellos la simple posibilidad de ver luz constituiría una bendición. Silverman opina que "dados nuestros resultados, creemos que al menos esta sensibilidad a la luz entra dentro de lo viable".

Si la fortuna acompaña a la técnica, los beneficiarios serían quienes padecen retinitis pigmentosa, enfermedad hereditaria, y quienes perdieron la visión por sobreexposición a la luz. Piénsese, además, que un diez por ciento de los adultos mayores de 60 años sufren problemas de ceguera parcial por degeneración macular, en la que la parte central de la retina resulta dañada y donde la visión es más aguda. En este caso, la pérdida de visión obedece, en buena medida, a la muerte de los fotorreceptores.

ERRATUM

Sustitúyase en el recuadro "La teoría de Ramsey y las progresiones aritméticas" de la página 77 del número de septiembre, la coloración de las progresiones dada por la siguiente

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Para impedir que se forme la progresión aritmética 4, 5, 6, coloreamos el 5 de rojo.

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Para impedir las progresiones 2, 4, 6, y 4, 6, 8, coloreamos de rojo al 2 y al 8.

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Ciencia y empresa

Ciencia en conexión

A Julian G. Rosenman le gustaría un método mejor de dirigir los haces de radiación para tratar tumores: una imagen tridimensional de la distribución de dosis en todo el cuerpo que se modelara en segundos, dejándole elevar lo suficiente los niveles de radiación para aliviar así ciertas clases de cáncer.

El problema es que Rosenman, profesor de radiología en el servicio oncológico de la Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill, necesita enviar la información desde un superordenador Cray, capaz de calcular las dosis de radiación, hasta un ordenador especializado en gráficos, capaz de crear de inmediato un modelo tridimensional. Mas, para ello, precisa velocidades muy por encima de las que ofrecen las redes informáticas existentes.

Rosenman es uno de los muchos investigadores que esperan con impaciencia aprovechar el acuerdo de principio del gobierno y de la industria privada para tender redes de fibras ópticas de alta velocidad que combinen el poder de cálculo de ordenadores alejados entre sí. Una suerte de laboratorio de cálculo de un extremo a otro del país.

El plan supondría unas inversiones de hasta 2000 millones de dólares para ordenadores y una red para enlazarlos. Una quinta parte de la inversión total se emplearía en una Red Nacional para la Investigación y la Educación (RNIE), superautopista de fibra óptica que podría transportar más de mil millones de bits (un gigabit) de datos por segundo, es decir, el texto de una enciclopedia.

Contemporáneamente, la Fundación Nacional de Ciencia (FNC) y la Oficina de Proyectos Avanzados de Investigación (OPAI) van a invertir 15,8 millones de dólares, amén de las aportaciones del sector privado, estimadas en 100 millones de dólares, para fomentar los avances en la técnica de redes.

Se parte del interés que la red del tipo gigabits reviste para la comunidad investigadora. "Pero necesitamos que la gente se anime a usarla para corroborarlo", dice Robert E. Kahn, presidente de la Corporación de Iniciativas Nacionales de Investigación de Reston, Virginia. La organización de Kahn coordina los trabajos de los investigadores académicos, industriales y gubernamentales para establecer cinco programas de prueba que desarrollen una base tecnológica para tal red.

Un importante obstáculo a superar es el de idear una versión más potente de conmutadores empleados para canalizar los datos digitalizados a través de redes de ordenadores a larga distancia. Esa técnica divide el mensaje del ordenador en "paquetes", que se canalizan a través de la red y se reagrupan luego antes de ser recibidos por otro ordenador. No se necesita un circuito distinto para cada mensaje, porque los paquetes circulan a través de la red mezclados entre sí en chorro continuo.

Los conmutadores de los paquetes suelen operar con excesiva lentitud para poder enviar videoimágenes y conversaciones orales a través de la red. Los datos que llegan a un conmutador de paquetes actual se almacenan en su memoria informática. El soporte lógico del conmutador determina entonces el camino óptimo para enviar el paquete por la red, antes de acometer esa tarea. "Si se tuviera que seguir todos los pasos en una red de alta velocidad, acabaría atascada", explica David J. Farber, profesor de informática y ordenadores de la Universidad de Pennsylvania y padre fundador de la RNIE.

Por esa razón, la red de la Fundación Nacional de Ciencia, arteria principal de un entramado radial de paquete existentes, usada por investigadores y universidades, se destina sobre todo al intercambio de correo electrónico y archivos de ordenador. Para resolver el problema, el programa Aurora está en la actualidad evaluando dos conmutadores de paquetes de altas prestaciones que han desarrollado independientemente IBM y Bell Communications Research (Bellcore).

El prototipo de conmutador de IBM, llamado Paris, trata de eliminar los tiempos muertos de procesado en el conmutador situando toda la información de envío en el propio paquete. El dispositivo toma un paquete y lo envía a una de ocho puertas; cada una de éstas se halla conectada a una línea que funciona a un gigabit por segundo. Bellcore pretende alcanzar mayor celeridad mediante equipos de conmutación a medida. Su conmutador, Sunshine, está construido alrededor de una pastilla de circuitos integrados, un "tejido conmutador", cuyas 32 líneas de entrada se pueden conectar a otras tantas de salida. Cada línea funciona a una velocidad de 150 millones de bits por segundo. Permite combinar hasta cuatro líneas entre sí.

La creación de conmutadores constituye sólo una de las múltiples dificultades técnicas implicadas. Queda por determinar la clase de dispositivos necesarios para conectar un ordenador a la red. Hay que modificar los programas de funcionamiento para evitar que ambos, el ordenador que transmite y el que recibe, se vean obligados a confirmar la transmisión correcta del paquete. Este intercambio de "Yo conforme, tú conforme" puede saturar la red y resultar innecesario, dada la eficacia de la transmisión óptica. Los programadores deben también pensar en prevenir que la corriente de datos de entrada sature el soporte lógico del sistema operativo que controla los programas de ordenador.

Aun cuando se resolvieran estos problemas, un paquete tarda diez milisegundos en ir del Instituto de Tecnología de California (Cal Tech) al Laboratorio Nacional de Los Alamos a la velocidad de la luz, tiempo durante el cual se pueden realizar diez millones de operaciones aritméticas en un superordenador.

Casa, otro de los cinco proyectos, se apresta a desarrollar nuevos algoritmos para evitar tiempos muertos. Cal Tech enviará una cadena de ecuaciones lineales mediante un enlace por fibra óptica a un superordenador en el Laboratorio Nacional de Los Alamos. Cuando el ordenador haya acabado de resolver una ecuación —por ejemplo, un modelo de reacción química— la próxima ecuación estará esperando. "Es como una línea de montaje de automóviles", ejemplifica Paul Messina, director del Centro de Superordenadores Concurrentes del Cal Tech. "Se tarda más o menos un día en echarla a andar, pero una vez funciona, puede sacar un coche por segundo".

No obstante, el fin último de una red gigabit no es otro que el de aportar un camino nuevo para la investigación. El proyecto Blanca, por ejemplo, tratará de demostrar la posibilidad de que científicos dispersos por todo el país trabajen al alimón en modelos atmosféricos y radioastronómicos.

Está en elaboración un modelo tridimensional de tormenta, que podría calcularse en el Centro Nacional de Aplicaciones de Supercomputación

de la Universidad de Illinois y seguir su manipulación en pantalla en la Universidad de California en Berkeley y en la de Wisconsin en Madison. "Un individuo en Berkeley podrá enviar a las nubes un globo meteorológico, mientras su colega en Madison sigue su comportamiento", expone Charles E. Catlett.

Además de un laboratorio electrónico interuniversitario, algunos investigadores desean distribuir las tareas de proceso entre diferentes máquinas, encargando a cada una lo que mejor hace. En la Universidad Carnegie-Mellon, científicos de la computación e ingenieros químicos colaboran en el proyecto Nectar para crear una simulación matemática de una planta de procesos químicos.

El superordenador Cray no puede resolver los millones de ecuaciones con velocidad suficiente para simular el funcionamiento de la planta al paso del proceso en cuestión, lo que permitiría a los ingenieros intervenir durante el mismo para mejorar el rendimiento o recortar el tiempo de procesado. Para superar ese escollo, se aprovecharía la capacidad flexible de procesado del superordenador, limitada a calcular las concentraciones químicas y otros datos que se enviarían después, a través de la red, para usarlas de variables en sistemas de ecuaciones lineales. Las ecuaciones se resolverían en procesadores paralelos especializados, cuyas prestaciones son comparables a las del Cray para trabajos altamente estructurados. Transferir datos de un ordenador a otro puede ser más fácil que imaginar cómo pagar una red de ordenadores.

Fármaco gota a gota

"Si de mayor quieres ser alto y fuerte, vete ya a dormir". Esta podría ser la orden de mayor peso para sacar a los niños del televisor y enviarlos a la cama. Durante la noche, durante el sueño, el cerebro del rapaz administra la hormona del crecimiento en cortas ráfagas aproximadamente cada noventa minutos. Cada ráfaga, de varios segundos de duración, termina con la entrega de una hormona contraria, en un bucle de retroalimentación perpetua que funciona a modo de termostato. Otras hormonas pituitarias, como las que controlan la fertilidad, se segregan también a ráfagas. La insulina, aunque no sometida al control de la pituitaria, sigue también un esquema análogo de apertura-cierre, acelerándolo sólo a las horas de las comidas.

Pese a ello, los métodos actuales de sustitución terapéutica de tales hormonas en las personas que padecen su deficiencia remedan muy poco, en su comportamiento, el proceder del organismo sano. Las inyecciones, aun cuando se repitan varias veces al día como en el caso de los diabéticos, se limitan a verter el fármaco, con la esperanza de que circule en cuantía suficiente cuando el cuerpo lo necesite. Las bombas portátiles que administran medicamentos por un catéter operan a intervalos estrictamente fijados, pero no a demanda del organismo, o bien requieren que el paciente calcule cuánto y en qué momento debe tomarlo. Los preparados de fármacos de acción retardada que existen, muy pocos, libran al paciente de las inyecciones frecuentes, pero no interactúan de una manera natural.

De ahí que se haya convertido en objetivo prioritario de las compañías de productos farmacéuticos y de los investigadores copiarle a la naturaleza su secreto de los patrones pulsátiles del organismo. La emulación de los ritmos naturales favorecería la eficacia de las hormonas, así como de otras proteínas e incluso de los compuestos químicos clásicos. Las medicaciones para la hipertensión, por ejemplo, son buenos candidatos: se requieren en los momentos de agotamiento. Las dosis pulsantes podrían mitigar los problemas de tolerancia que algunos pacientes desarrollan cuando han de tomar drogas cardiacas y anti-inflamatorias para dolencias crónicas.

Las estrategias de administración intermitente que más entusiasmo levantan ahora son polímeros que sueltan el medicamento según pedido. Robert Langer, profesor de ingeniería bioquímica en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, fue el pionero de la liberación controlada de proteínas por parte de polímeros en los años setenta. Más recientemente, su laboratorio ha desarrollado los polianhidridos, polímeros que se van gastando en el cuerpo como la pastilla de jabón. Lo fabrican, bajo licencia, Nova Pharmaceuticals y otras empresas. Nova implanta obleas del polímero mezcladas con un fármaco anticanceroso en el cerebro después de la extirpación quirúrgica de tumores locales.

Las obleas en cuestión facilitan la salida, lenta y continua, del fármaco. Conseguir que los polímeros liberen el fármaco en impulsos que respondan al organismo es mucho más difícil. Una solución es hacerlos reaccionar ante un estímulo metabólico: ante determinada concentración de cierto metabolito en la sangre se provoca una racha del fármaco. Langer desarrolló un sistema así para administrar insulina a los diabéticos, en colaboración con Larry Brown, ahora investigador principal de Enzytech.

Esta última empresa usa la glucosa como desencadenante. Tras la comida, cuando un diabético digiere los alimentos, aumenta el nivel de glucosa en el organismo. El azúcar se difunde dentro de un pequeño bloque de polímero implantado e impregnado de insulina. Incorporadas también en el bloque hay bolitas de polímero que contienen una enzima que convierte la glucosa en ácido glucónico. El cambio resultante de acidez hace más soluble la insulina que, por difusión, sale del bloque y se incorpora en el torrente sanguíneo.

Ese tipo de interacción insulina-glucosa se reproduce en otro método polimérico, basado en el enlace competitivo. Sung Wan Kim, del centro de administración químicamente controlada de la Universidad de Utah, añade un apéndice químico a la insulina que provoca el enlace de ésta con la concanavalina A, una proteína. La glucosa tiene una afinidad todavía mayor para enlazarse con la misma proteína. Kim introduce el complejo insulina-concanavalina en una bolsa de membrana de polímero y la implanta en la cavidad abdominal. La penetración paulatina de la glucosa desaloja la insulina.

"Si tuviéramos el metabolito apropiado, podríamos hacer lo mismo con otras enfermedades", dice Kim. Las lipoproteínas de baja densidad, por ejemplo, podrían impulsar a los fármacos contra la hiperlipidemia hacia el torrente saguíneo. Otros desencadenantes podrían servir para las medicaciones de la esquizofrenia o la epilepsia.

De muchos fármacos se desconoce su desencadenante biológico o material de enlace preferido, lo que no impide la aplicación de sistemas internos de administración regulada. Los polímeros termosensibles que se degradan en una persona febril podrían servir para ello. Un cambio de cinco grados Celsius, de 25° a 30°C, "puede convertir una pared de polímero de cemento en espaguetis", explica Kim, permitiendo la administración rápida. Por desgracia, un cambio de cinco grados equivale a una fiebre letal, de modo que el método está lejos de ser viable.

Un proceso tan elemental como la presión osmótica posibilita la administración oral pulsante para ciertos medicamentos, prosigue Jane E.

se adelantó el circuito integrado. Ello no detuvo la investigación, dedicada a partir de entonces a equipos militares que resultasen inmunes a explosiones de radiación electromagnética. Los expertos han robado la técnica empleada para imprimir circuitos en los semiconductores de silicio y construir conjuntos de millones de diminutos cátodos que responden a la denominación de emisores de campo.

La primera demostración ha correspondido a un grupo del Laboratorio de Electrónica, Tecnología e Instrumentación (LETI), adscrito a la Comisión francesa de Energía Atómica. "Es un avance realmente importante", dice Capp Spindt, director del programa de microelectrónica de vacío de SRI International y creador de gran parte de la técnica básica adaptada por el laboratorio francés.

Si se comercializase, la pantalla plana de microelectrónica de vacío podría aplicarse a los ordenadores portátiles e instrumentación de aviones y automóviles. Sería ideal para pantallas de televisión de alta definición.

Pero a los investigadores franceses les queda un largo camino hasta que su técnica compita con el bajo coste del tubo de rayos catódicos. Su prototipo de pantalla, de 9 por 11 centímetros, usa microelectrónica de vacío para iluminar una red de solamente 256 por 256 elementos de figura, o pixeles, sobre un substrato de vidrio.

La posibilidad de recabar fondos para ulteriores trabajos de desarrollo estuvo en el punto de mira de su exposición en la tercera conferencia de microelectrónica de vacío del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE), el pasado julio. Había perdido la ayuda financiera del grupo francés Thomson Consumer Electronics. Thomson decidió que el proyecto estaba en mantillas, y la empresa "no podía esperar diez años".

A pesar de todo, el grupo LETI causó auténtica sensación en la reunión del IEEE con una diapositiva de una videoimagen en blanco y negro de Mary Poppins controlada por 70 millones de diminutos tubos de rayos catódicos, unos 1000 por cada pixel. Cada uno es un cono de molibdeno de 1,2 micrometros de altura, implantado en una rejilla de electrodos. Para la elaboración de esas diminutas estructuras se aplicó la técnica de deposición fotolitográfica y de haz de electrones que se emplea en circuitos integrados.

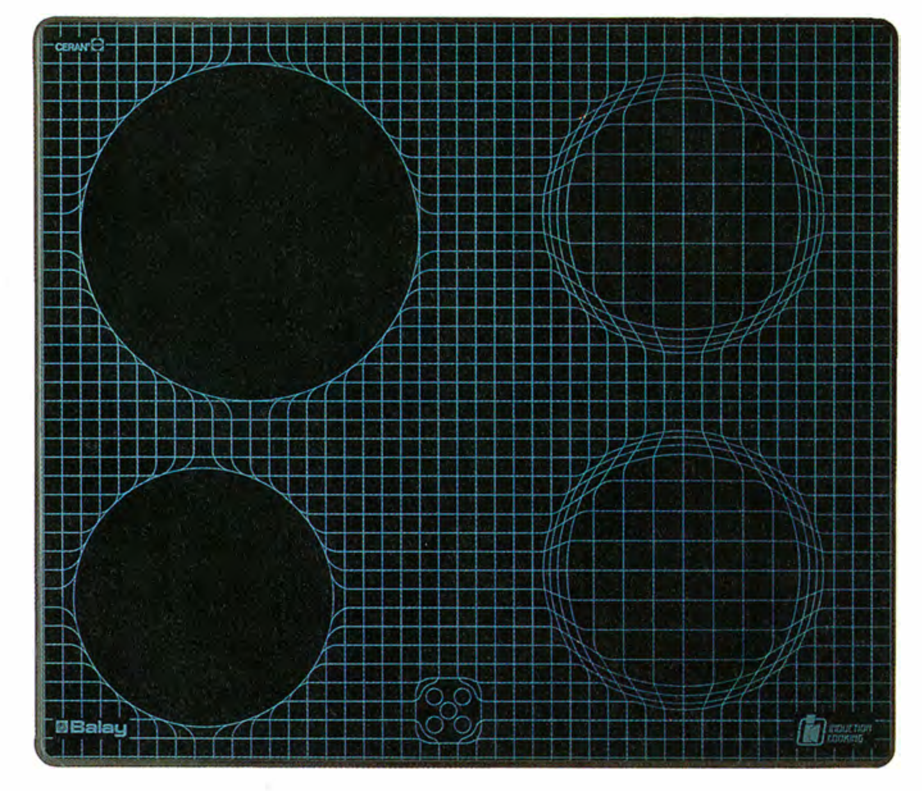
La geometría en miniatura produce campos altísimos en el extremo de cada micropunta —más de 10 millones de volt por centímetro— cuando se establece una tensión de 50 a 80 volt entre los electrodos. Este campo impulsa los electrones a través de un vacío de 200 micrometros para activar el fósforo depositado en la superficie de vidrio de la pantalla. Estos cátodos fríos tienen poca semejanza con los tubos de rayos catódicos usados en los televisores domésticos, que emiten electrones sólo cuando se calientan a 1000 grados Celsius.

El grupo LETI ha progresado en la resolución de algunos problemas relativos a la construcción de pantallas de microelectrónica de vacío. Había descubierto, en un comienzo, que la corriente circulaba profusamente a través de algunas de las micropuntas que forman cada pixel, mientras que otras puntas apenas generaban corriente. "Los pixeles no brillaban uniformes". Al añadir una capa de silicio de dos micrometros de espesor bajo las micropuntas, se creaba suficiente resistencia para suavizar las disparidades de corriente; la diferencia de brillo no llegaba al 10 por ciento en cada pixel.

Como las pantallas requieren relativamente pocos pasos litográficos, se supone que su fabricación costará menos que otras pantallas de cristal líquido, su principal técnica competidora. Pero los varios pasos añadidos para mejorar el brillo de la imagen podrían perjudicar el objetivo de lograr un proceso sencillo de fabricación, objeta Webster E. Howard, director de técnicas de pantalla plana en el Centro de Investigación IBM Thomas J. Watson. "Cuando uno empieza a resolver problemas añadiendo complicaciones, hay que llevar cuidado de que, al final, se salve la economía buscada", advierte.

Podría haber otros proyectos en marcha. Se sabe que los soviéticos han realizado trabajos en microelectrónica de vacío. Hughes Aircraft está considerando el uso de pantallas en miniatura que podrían incorporarse en la carlinga de los aviones o en el cuadro de mandos de los automóviles. Los japoneses, por su parte, trabajan, con secreto cerrado bajo siete llaves, en esa dirección. "Cualquiera de las compañías japonesas importantes que se le ocurran a uno está probablemente trabajando en ello", dice Spindt, de SRI.

Demostrada la viabilidad de esas pantallas, muchos redoblarán sus esfuerzos. Así, una técnica que hunde sus raíces en el siglo XIX podría adelantar la electrónica del siglo XXI.



2. Placa de inducción de alto rendimiento térmico diseñada en los laboratorios de investigación de la compañía Balay.

Ahorro energético en la cocina

El repaso de la historia de los métodos de cocción sobre superficie nos retrotrae al siglo XVI, cuando aparecieron las cocinas económicas de hierro con una placa de cobre agujereada, sobre la que se colocaban los pucheros. Se empleaba, por combustible, carbón de piedra o coque. La

introducción del gas en la cocina, ya en el siglo pasado, constituyó una auténtica revolución; no producía humos y presentaba, por contra, un encendido y apagado instantáneos. La posterior incorporación de la cocina eléctrica ofrecía la ventaja de su limpieza, al no haber productos de combustión, pero el encendido y el apagado dejaban de ser instantáneos. Refinamiento de la cocina eléctrica ha sido la placa vitrocerámica, de encendido más rápido, extrema limpieza y, lo que no es secundario en el artilugio, su estética. Da opción, además, a otros elementos calefactores: las lámparas halógenas.

Todos los sistemas de cocción descritos comparten una propiedad, la de poseer un foco calorífico externo, denomínese llama, resistencia eléctrica o lámpara halógena. El departamento de investigación y desarrollo de la empresa española Balay, en conexión con el grupo de tecnología electrónica del departamento de ingeniería eléctrica e informática de la Universidad de Zaragoza, ha logrado dar un paso adelante con las placas de cocinar por inducción electromagnética, en las que el calor se genera en el propio recipiente.

Para provocar el fenómeno de la inducción hay, bajo la superficie sobre la que se cocina, una bobina de forma geométrica plana. Se rectifica la tensión de la red eléctrica y se filtra, tras lo cual se convierte en una tensión alterna de varias decenas de kilohertz mediante la adecuada conmutación de unos transistores de potencia. Esta tensión, aplicada sobre la bobina, origina una intensidad de esa misma frecuencia que, a su vez, crea un flujo magnético.

Cuando acercamos a la bobina un recipiente de material ferromagnético (hierro, acero esmaltado o acero inoxidable con componentes magnéticos), el flujo magnético variable provoca en el recipiente dos fenómenos distintos. Por un lado, se inducen unas corrientes parásitas, o corrientes de Foucault; éstas, por ser el recipiente un material conductor de electricidad y estar dotado de determinada resistencia eléctrica, provocan en él un calentamiento por efecto joule. Por otro lado, al ser de material ferromagnético el recipiente, se halla dividido en dominios o regiones en cuyo interior los dipolos magnéticos se orientan en paralelo. El flujo magnético variable que la bobina origina hace que los dominios modifiquen su orientación de manera alternante, lo que produce una intensa fricción, causa del calentamiento del material.

Gracias a ello, las placas de cocinar por inducción aportan numerosas ventajas. El rendimiento energético que se alcanza supera el de los métodos de calentamiento habituales, porque, al generarse el calor en el propio recipiente, no hay pérdidas en calentar la propia resistencia y la zona de cocción o en calentar el ambiente si no hay un apoyo perfecto del recipiente. Si comparamos el rendimiento obtenido (es decir, la energía calorífica transmitida a un litro de agua dividida por la energía consumida) en la cocina por inducción con otros métodos calefactores, y suministrando obviamente en todos los casos la misma potencia, observamos que el método de inducción consigue una eficacia del 72 por ciento, el halógeno llega al 56,5 por ciento, el gas a 51,1 por ciento, la vitrocerámica al 50 por ciento y el rendimiento de la cocina eléctrica es sólo del 41,4 por ciento.

Además de su alto rendimiento térmico, la placa de inducción ahorra el máximo de energía porque sólo funciona cuando el recipiente se encuentra en la zona de cocción; la variación de la inductancia que provoca en la bobina la presencia del cacharro sirve para detectarlo, suministrando sólo entonces la potencia requerida. (J. Sancho.)



Energía para la industria

Los procesos industriales consumen las dos quintas partes de la energía del mundo desarrollado. Las mejoras obtenidas en el rendimiento han recortado progresivamente esta fracción y prometen continuar en esa vía

Marc H. Ross y Daniel Steinmeyer

Una feliz paradoja ha sorprendido a la evolución industrial de los últimos 20 años: la producción ha crecido sustancialmente y ha bajado el consumo total de energía. Las compañías han provocado esta aparente contradicción sacándole mayor rendimiento a los procesos industriales e invirtiendo en el aprovechamiento de energía a medida que el precio de ésta subía. Los consumidores han ayudado también a reducir el gasto energético de la industria escogiendo productos que requieren menos energía en su fabricación y uso.

En los Estados Unidos, desde 1971 hasta 1986, la "intensidad energética" de los procesos industriales, así se denomina la cantidad de energía necesaria para producir una tonelada de acero o un kilogramo de polietileno, ha disminuido entre un 1,5 y un 2 por ciento anual (la intensidad energética procedente de la combustión de los derivados del petróleo ha disminuido un 3 por ciento, mientras que la intensidad eléctrica ha permanecido virtualmente constante). Esta mejora en el rendimiento, sumada a los cambios en el conjunto de productos comerciales, ha determinado la caída en un 1 por ciento anual de la energía total utilizada, a pesar del crecimiento del 2 por ciento en la producción industrial. (Los datos fragmentarios disponibles sobre años más recientes muestran que el curso continúa, aunque más lento.)

Son ahorros importantes. Los procesos industriales representan aproximadamente el 40 por ciento de la energía empleada en el mundo desarrollado. Más de la mitad de esta energía sirve para transformar menas y materias primas en mercancías fundamentales (el acero y la gasolina); el resto se usa en agricultura, minería, construcción y fabricación de artículos intermedios y acabados.

La razón por la cual la industria ha podido reducir con semejante firmeza el consumo energético es muy sencilla: todas las líneas, o casi, del proceso de fabricación gastan mucha más energía que la mínima requerida según las leyes termodinámicas. Estas especifican la mínima cantidad de energía necesaria para realizar un trabajo físico (trasladar una masa de un lugar a otro más alto, separar los componentes de una mezcla o conducir una reacción química hasta un estado energético más alto).

Sin embargo, tal como ocurre incluso en las plantas más eficientes, las operaciones básicas, verbigracia, separación de oxígeno del aire y producción de etileno a partir de petróleo, gastan entre 4 y 6 veces el mínimo termodinámico. Además, muchos procesos industriales, que gastan grandes cantidades de energía, recuérdese la producción de componentes metálicos hechurados o la soldadura entre componentes, no requieren en principio energía.

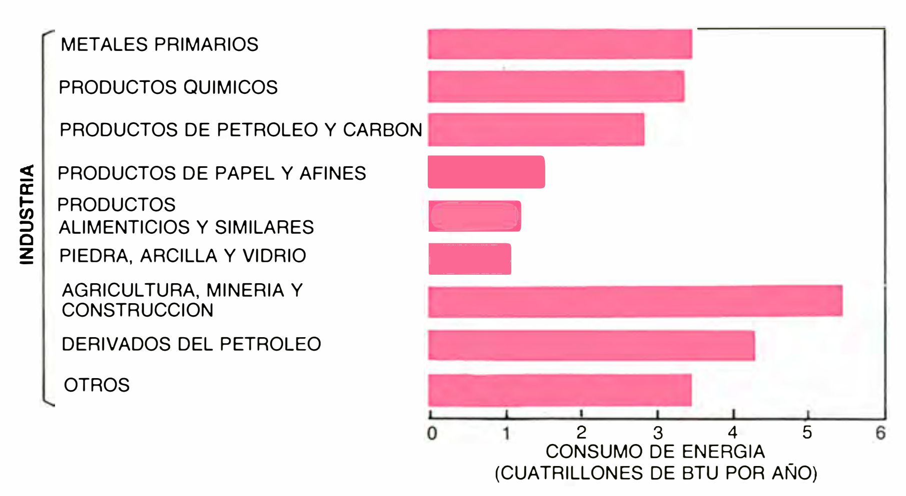
Este amplio margen para la mejora ha posibilitado las reducciones energéticas consignadas y que continúen por esta vía en el futuro. Las reducciones en el gasto energético proseguirán recorriendo un largo camino hasta la meta de un recorte del 20 por ciento de las emisiones de dióxido de carbono en los próximos veinte años, meta propuesta por los investigadores preocupados por el efecto de invernadero.

La reducción del consumo energético sienta sus bases en algunas leyes físicas fundamentales. En primer lugar, estrictamente hablando, la energía ni se crea ni se destruye. Lo que se consume es la capacidad de la energía de transformarse en una forma particular para efectuar un trabajo. Por ejemplo, una central térmica de carbón transforma la energía química de un trozo de carbón en la energía térmica de un vapor sobrecalentado, que mueve una turbina y genera electricidad. En este caso, cerca del 35 por ciento de la energía química del carbón se convierte en electricidad; el resto se pierde en los gases de combustión, que se escapan por la chimenea de la caldera, y en el vapor que deja la turbina, de escasa capacidad para realizar un trabajo.

Cualquier transformación práctica que convierte energía de una forma en otra pierde algo de su capacidad de producir trabajo. Por consiguiente, mejor que utilizar la energía con el máximo aprovechamiento es no tener que utilizarla en absoluto. Y así, las actividades que muestran escasa relación con el gasto de energía, como el control de calidad o el reciclaje de residuos, podrían tener un enorme impacto en el consumo de energía. El reciclaje sortea la mayoría de las etapas de intensa energía de los procesos de fabricación: la conversión de me-

1. EN EL HORNO DE ACERO hallamos un ejemplo de la energía que se consume en la transformación de materias primas en artículos tales como metales, vidrio, plástico y papel. Los nuevos procesos industriales (producción directa de acero o su fabricación a partir de chatarra en hornos de arco eléctrico) podrían reducir, con el tiempo, la energía industrial consumida a una pequeña fracción de su gasto actual.

MARC H. ROSS y DANIEL STEINMEYER han dedicado más de 15 años al estudio del consumo energético en la industria. Ross es profesor de física de la Universidad de Michigan en Ann Arbor e investigador en el laboratorio Argonne. Doctor en física por la Universidad de Wisconsin en Madison, trabajó 20 años en el dominio de las partículas elementales antes de consagrarse a los problemas de la energía y el medio ambiente. Steinmeyer, ingeniero de la compañía Monsanto, es licenciado en económicas e ingeniería por las universidades de Washington y Ann Arbor, respectivamente.



2. LOS PROCESOS INDUSTRIALES son los responsables del 37 por ciento de la energía consumida en USA. La mayor parte de esta energía va destinada a las industrias que transforman materias primas.

nas y materias primas en materiales fundamentales. Los controles de calidad efectivos sirven, por su parte, para ahorrar la energía que habría que aportar a la producción de artículos defectuosos.

En la práctica, las empresas reducen el consumo de energía —la transformación de energía de formas útiles en inútiles— optimizando el coste de los procesos existentes, introduciendo mejoras en los procesos y efectuando innovaciones que modifiquen de raíz los métodos de producción. El primer factor, la optimización de costes, cae por su peso: conforme aumenta el coste de la energía, las compañías sustituyen los equipos para evitar su pérdida (aislamientos más herméticos, intercambiadores de calor más largos y otros aparatos para ahorrar energía), reduciendo así el consumo.

El segundo, las mejoras en los procesos, se acomete aun cuando no suba el precio de la energía. Las mejoras técnicas reducen el coste de un proceso industrial de un 1 a un 2 por ciento anual de media, y rebajan de igual forma los costes energéticos, los costes laborales y los costes materiales. Puesto que las mejoras incrementan la capacidad de producción, reducen los costes de capital en vez de aumentarlos, al contrario de lo que ocurre con la optimización. (Por lo común producen también menos residuos, lo que favorece la productividad o el rendimiento de un proceso al hacerlo más limpio.) Los ejemplos a este respecto van del control automático a una catálisis depurada para las reacciones químicas.

Finalmente, las innovaciones científicas y técnicas permiten reducciones bastante rápidas y profundas en los requerimientos energéticos de la industria. Por ejemplo, el proceso de laminación de vidrio, adoptado a mediados de los años sesenta, produce láminas de vidrio sobre una superficie plana de estaño fundido. Con eso se economiza la energía que antes se requería para pulir el vidrio después de la solidificación.

De forma similar, el proceso de conversión de acero por soplado de oxígeno, adoptado en los años sesenta, consume sólo cerca de la mitad de la energía que se utilizaba en los métodos de horno abierto que le precedieron. El oxígeno se sopla sobre el metal fundido y quema la mayoría del carbono presente (la proporción precisa se puede ajustar fácilmente), y el calor generado por la combustión dentro del metal suple la energía necesaria para eliminar las otras impurezas en forma de escoria. (Los hornos abiertos se calentaban enteramente desde el exterior.) Otros procesos de afino, utilizados hoy en Japón, capturan la energía química de los gases emitidos por el convertidor y, de esta forma, disminuyen la energía perdida hasta casi cero.

Estos ejemplos tan dispares de disminución del consumo energético ponen de manifiesto la pluralidad de aspectos implicados en la actividad industrial. A diferencia de la construcción o el transporte, sectores donde pueden aplicarse ampliamente unas cuantas soluciones básicas para reducir de forma drástica el consumo global de energía, la industria requiere abordar caso por caso. Algunos mecanismos para la conservación de la energía (motores para bombas de velocidad variable, en vez de motores de velocidad constante y válvulas de reducción de caudal, intercambiadores de calor en vez de refrigerantes para una corriente y calentadores para otra, o controles automáticos de procesos) comienzan a esbozar el abanico de opciones que pueden mejorar miles de procesos distintos.

Para sacarle el máximo partido al consumo de energía en un proceso industrial, hemos de desglosar el proceso en etapas y comparar la cantidad teórica de energía requerida para

3. POR INTENSIDAD ENERGETICA se entiende la cantidad de energía necesaria por unidad de producción. Ha disminuido gracias a la competencia. En efecto, y a modo de ejemplo, las compañías de ingeniería venden instalaciones de producción de etileno, un producto químico fundamental, tomando como base el rendimiento de producción y la energía requerida por unidad de peso. Entre 1955 y 1990, las necesidades energéticas disminuyeron cerca de dos terceras partes; sin embargo, el consumo de energía todavía se encuentra por encima del mínimo que marcan las leyes termodinámicas. Para minimizar costes energéticos, se invierte en análisis termodinámicos mediante ordenador.

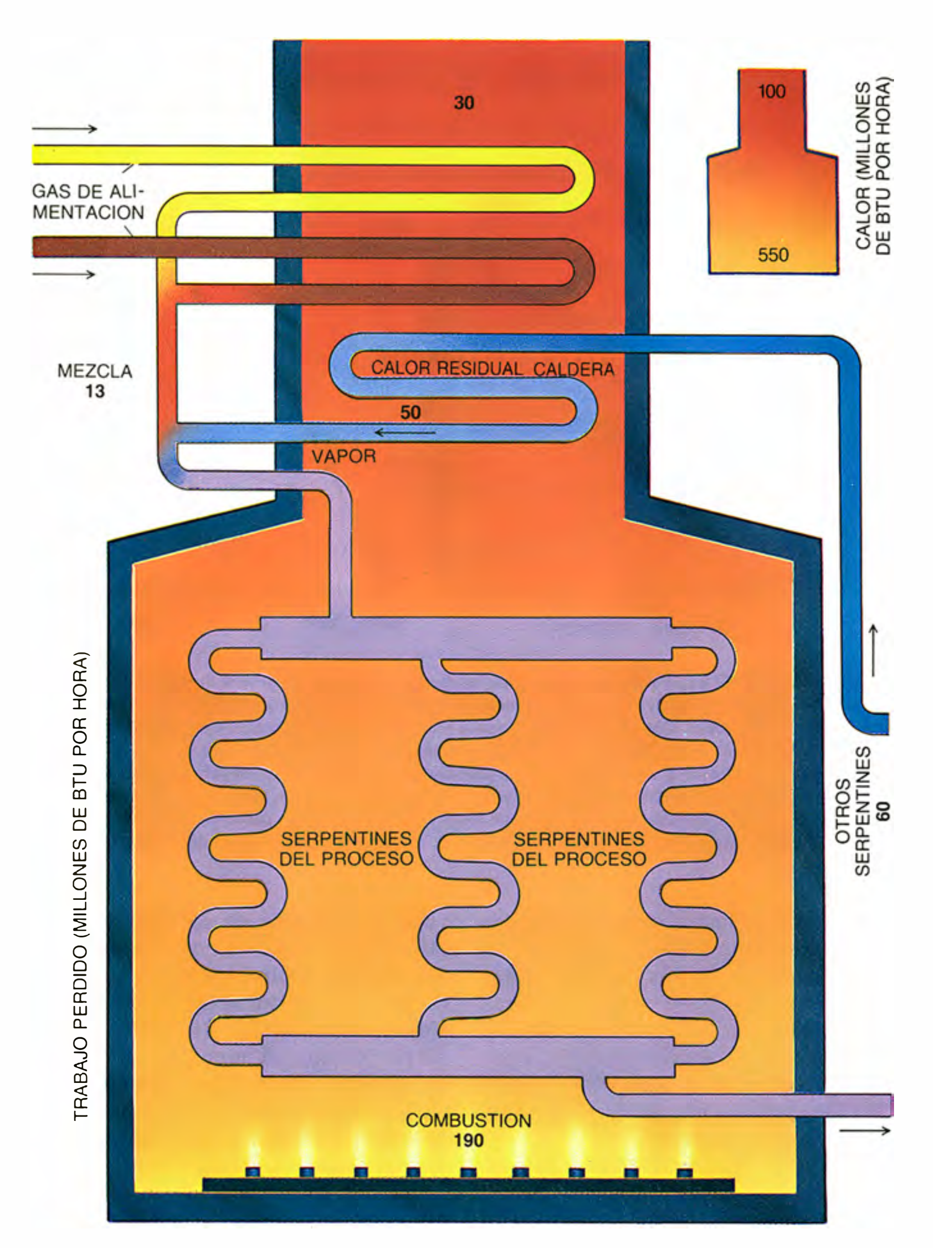
cada etapa con la realmente consumida. No avanzamos mucho, por ejemplo, sabiendo que una columna de destilación que separa etileno y etano consume cinco veces la mínima energía teórica; lo que importa es conocer cuáles son las partes del proceso de destilación responsables de la pérdida mayoritaria de la capacidad de la energía suministrada para realizar el trabajo.

Si el 60 por ciento del "trabajo perdido" proviene de la diferencia de temperatura entre la corriente del proceso y las corrientes de calentamiento y enfriamiento, que añaden o sustraen calor de las corrientes del proceso, entonces está claro que la energía puede conservarse reduciendo las diferencias de temperatura. Condición que puede cumplirse empleando mayores intercambiadores de calor y rediseñando el equipo de refrigeración para obtener temperaturas más próximas a las que trabaja el proceso.

Este tipo de mejora en el rendimiento está respaldado por la posibilidad de acometer distintas tareas con diferentes fuentes de energía. Se logran ahorros considerables acomodando bien las piezas. Así, un chorro de vapor incapaz de mover una turbina puede servir para calentar una corriente de alimentación química a la temperatura deseada o para secar papel en una industria papelera.

Decidir si es rentable invertir capital en energía mediante la instalación de intercambiadores de calor más largos u otros equipos más eficientes es, sobre todo, cuestión de economía. Las empresas buscan un equilibrio entre los costes anuales (intereses y amortizaciones) de capital empleado para reducir el consumo de energía y los costes de la energía necesaria para la producción de sus artículos. El coste de las bombas, intercambiadores de calor, sistemas aislantes y dispositivos similares aumenta en función del tamaño, como lo hace igualmente su contribución combinada en el rendimiento energético.

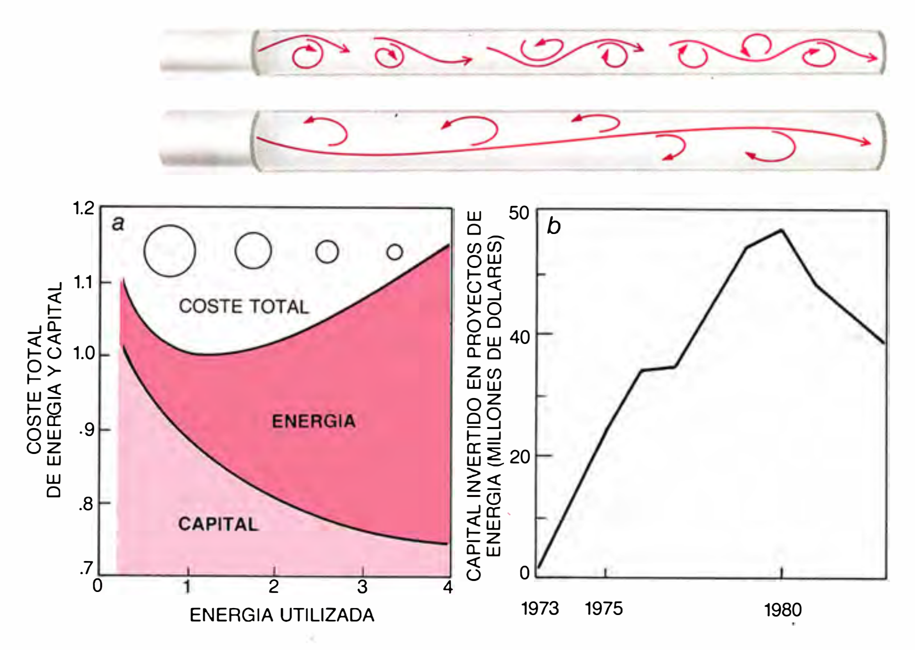
Pero esas optimizaciones no son siempre fáciles de lograr. El coste anual de capital de numerosas instalaciones sobrepasa, en mucho, el coste de la energía utilizada en su operación. (En este orden, la industria química gastó en 1989 casi tres veces más de capital en equipos que en energía). Las empresas no suelen descartar los equipos envejecidos por la exclusiva razón de que la subida de los precios de la energía los hayan hecho menos eficientes de lo que sería deseable.



4. EL ANALISIS TERMODINAMICO proporciona a los ingenieros "nuevos ojos" para reducir el consumo energético. Un simple vistazo a un horno de tratamiento químico da una idea de la energía de combustión que entra (550 millones de Btu por hora) y de la cantidad de calor que sale por la chimenea (100 millones de Btu por hora). La posibilidad de ahorro por mera recirculación de los gases de salida del horno es limitada; sin embargo, un análisis más complejo revela mayores posibilidades concentrándose en el "trabajo perdido", que es la capacidad que tiene el calor para realizar tareas útiles. El trabajo no sólo se pierde por los gases que salen de la chimenea; se pierde también al mezclar corrientes de proceso calientes y frías, en el precalentamiento y ebullición del agua para crear vapor, en la transferencia de calor desde el horno hasta los serpentines y en la quema del combustible. El derroche mayor ocurre en la combustión, pérdida que podría menguarse precalentando el aire de combustión con el calor residual, o mezclándolo con la salida de gases de una turbina.

A modo de ejemplo: un cuádruple incremento en el precio de la energía (tal como ocurrió en la crisis del petróleo del año 1973) conduce hacia una disminución del 70 por ciento en la energía óptima para bombear un fluido por una longitud dada de tubería. Ahora bien, la reducción de la energía consumida en el sistema de tuberías en esa cuantía sólo repercutiría en un aumento del 13 por ciento en los costes totales. Los ahorros energéticos podrían justificar fácilmente las medidas de conservación en una nueva instalación, pero sería necesario justificar los costes de sustitución de los equipos en las plantas ya existentes.

Hay otros factores que retrasan de igual forma la adopción de la tecnología de ahorro energético. Puede ocurrir que los ingenieros se vean incapaces de encontrar la solución apropiada de ahorro energético para su proceso industrial particular; e incluso conociéndola podrían tener pro-



5. OPTIMIZACION ECONOMICA del uso de la energía. Aunque nos lleva a drásticas disminuciones en el consumo, se ahorra sólo una pequeña fracción de los costes generales. Por ejemplo, un sistema de conducciones bien dimensionado cuesta siete veces la energía necesaria para bombear el fluido a través de él. A medida que se estrecha el diámetro de las tuberías, baja el coste de capital, pero se eleva el relativo a la energía (*a*). La instalación de tuberías de mayor diámetro para reducir las pérdidas por fricción podría justificarse en una fábrica nueva, pero no en otra anticuada. Este balance ayuda a explicar por qué, aunque los precios de la energía subieron astronómicamente en 1973, muchas empresas no invirtieron apenas en ahorro energético hasta años más tarde (*b*).

blemas para convencer a los gerentes de que les dejen actuar. Pueden éstos dudar de si les es más rentable dotar a las instalaciones de equipos eficientes, derribar las instalaciones viejas y levantar otras nuevas o limitarse a esperar y observar si bajan los precios de la energía (como hicieron a principios de los ochenta).

Esta elección es particularmente difícil en empresas marginales, donde una decisión desacertada puede conducir, no a una merma de ganancias, sino a la misma bancarrota. En la mayoría de los negocios, los empresarios se imponen un horizonte a corto plazo en las inversiones destinadas a la reducción de costes, así los de conservación de la energía, de modo que los directivos dediquen su atención al desarrollo de nuevos mercados y convenios financieros. La regla viene a ser que la inversión se amortice en un plazo de 2 a 4 años.

El balance económico entre el consumo de energía y el capital para equipamiento incentiva la reducción del consumo energético sólo cuando el precio de la energía sube más deprisa que los costes de infraestructura. Las mejoras en los procesos son un argumento mucho más definitivo para aumentar la eficiencia porque no contraponen energía y capital, sino que reducen el consumo energético y los costes de capital al mismo tiempo.

En la mayoría de los procesos de fabricación, cada vez que se dobla la producción acumulativa, los costes totales de elaboración (energía incluida) disminuyen alrededor de un 20 por ciento. A menudo, el ahorro en energía resulta mera consecuencia de los cambios que se efectúan para mejorar la calidad o para aumentar la productividad. Consecuencia que se ha puesto de manifiesto en procesos muy dispares, desde la producción de acero hasta la fabricación de polietileno. La curva de aprendizaje no depende del incremento en el coste de la energía; de hecho, se realizaron mejoras energéticas sustanciales en estos y otros procesos durante los años cincuenta y sesenta, cuando el precio de la energía era bajo y, en muchos casos, incluso disminuía.

Los avances en la producción de amoníaco nos ofrecen un ejemplo típico de refinamiento de un proceso. En una planta de amoníaco, las corrientes de nitrógeno e hidrógeno pasan a elevada presión sobre un catalizador, provocando la combinación de una fracción de estos gases; la fracción que no ha reaccionado se recicla. Un nuevo esquema geométrico de las superficies del catalizador, desarrollado por M. W. Kellogg, empresa texana de ingeniería, aumenta el contacto entre los reactivos y el catalizador; de este modo, se consigue un mayor porcentaje de amoníaco y un 6 por ciento de aumento en la producción. Al mismo tiempo, el nuevo esquema reduce las necesidades de presión para forzar el reactivo a través del lecho catalítico, disminuyendo el consumo de energía en un 5 por ciento, aproximadamente.

La introducción de bolsas de aire recubiertas de caucho en la amortiguación de matrices utilizadas en prensas de estampación constituye un ejemplo de mejora en un proceso clásico. Hasta ahora, los troqueles empleados para conformar algunos componentes de chapa metálica, tales como los paneles de carrocerías de automóviles, funcionaban con pistones de aire comprimido, que tienden a presentar pérdidas. Las bolsas de aire no tienen pérdidas, consumiendo mucho menos aire que los pistones. La empresa que desarrolló estas bolsas, Smedberg Machine, encontró que este nuevo sistema rebajaba las necesidades de aire comprimido en un 50 por ciento y el consumo global de energía en un 25 por ciento. Se han producido economías similares en el mantenimiento, ahora innecesario. Asimismo, las bolsas de aire reducen significativamente el riesgo de que la línea de producción se pare por un fallo de un solo pistón.

La adopción generalizada de controles automáticos de proceso muestra, con mayor nitidez, cómo los ahorros energéticos eran consecuencia secundaria de la búsqueda de otros objetivos: reducción del personal técnico y mayor seguridad. Antiguamente, las columnas de destilación, que separan dos componentes de una mezcla en razón de su diferente punto de ebullición y gastan un 5 por ciento de todo el consumo energético industrial, estaban gobernadas por controles de retroalimentación. Los encargados ajustaban los flujos de vapor de alimentación en función de las variaciones en la composición de los productos de salida de la columna. Gastaban así bastante más vapor que el mínimo necesario para asegurar que la columna tolerase oscilaciones en la composición del alimento o en la temperatura, sin que ocurrieran fallos catastróficos.

Hoy en día, los sensores situados en una columna y en sus líneas de alimentación suministran suficiente cantidad de datos para la utilización del control anticipado. Este control ajusta los flujos de vapor de alimentación y de producto de acuerdo con las ecuaciones de transferencia de calor y de materia, con tal de que el producto final de la columna posea la composición deseada; el control anticipado permite además operar con las colum-

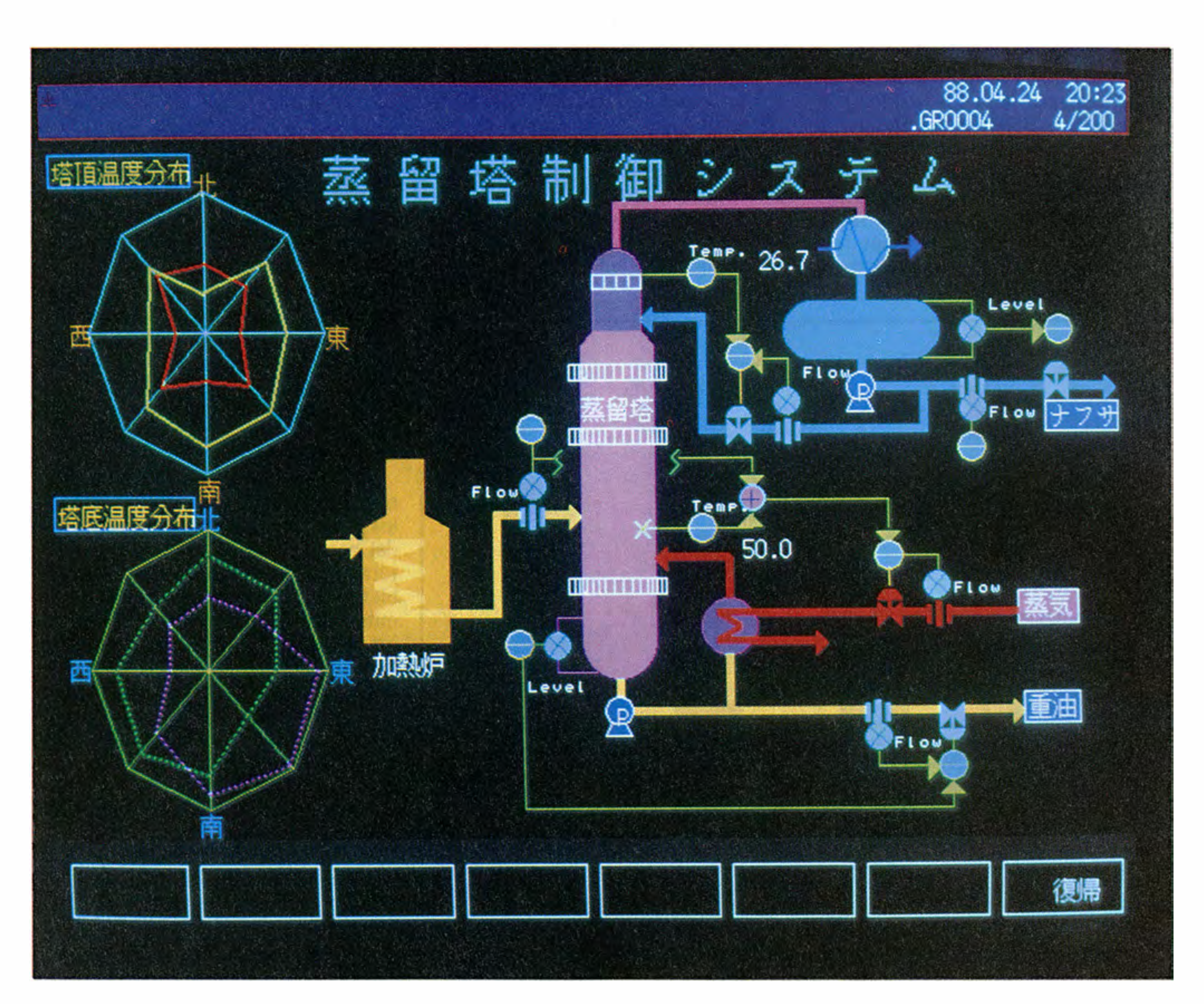
nas a tasas de alimentación más altas; por consiguiente, cuesta menos una planta de control anticipado que otra con la misma capacidad de producción pero controlada por retroalimentación. Y lo que es más, el consumo energético disminuye entre un 5 y un 15 por ciento debido a que el control anticipado ajusta las variaciones de alimentación derrochando mucho menos vapor.

En la industria papelera, otro sector que consume gran cantidad de energía, los controles automáticos pueden optimizar la combinación de sustancias químicas y calor necesarios para producir pasta de alta calidad; pueden también fijar el tiempo de duración de las operaciones para reducir las necesidades de potencia máxima, recortando de esta forma los costes adicionales de energía. En una fábrica, los sensores y controles rebajaron las variaciones en la calidad de la pulpa en un 31 por ciento y redujeron simultáneamente el consumo de vapor en un 19 por ciento.

Aunque no todos los avances en los procesos son tan tajantes, una cadena de pequeñas mejoras acumuladas en el tiempo rinden sustanciales dividendos. Pensemos, a este propósito, en las mejoras energéticas anuales en los procesos que producen etileno a partir del etano, que han promediado un 3 por ciento desde 1960. Los beneficios tuvieron su origen en muchas y distintas fuentes: motores, bombas y compresores más rentables, diseño de vías químicas para intercambiar energía entre corrientes calientes y frías; mejoras en los controles de proceso para obtener productos más estables, y hornos selectivos para aumentar el rendimiento del etileno respecto a otros compuestos. Tomada en su conjunto, esta serie de pequeños ahorros energéticos han rebajado en un 60 por ciento la energía necesaria para producir un kilogramo de etileno a partir del etano.

El ejemplo del etileno reviste especial interés porque el sector químico representa más de un 15 por ciento del consumo industrial (más que ningún otro), y, dentro de la industria química, la productora de etileno es la mayor consumidora de energía. El etileno y sus derivados constituyen la materia prima para la síntesis de otros productos orgánicos. Pero queda mucho camino por recorrer. La cantidad de energía utilizada en la conversión de etano en etileno es alrededor de cuatro veces el mínimo requerido por las leyes termodinámicas.

Aunque se realicen de la forma



6. EN LA PANTALLA de un sistema automatizado de control de procesos aparece una columna de destilación (*rosa*). Las figuras circulares (*izquierda*) indican la temperatura en varios puntos de la columna. El diagrama de tuberías (*derecha*) muestra el estado del material alimentado en el interior de la columna, el estado del material extraído de ella y el estado del material reciclado. Controles de ese tipo rebajan la demanda energética en un 10 por ciento o incluso más, al tiempo que hacen viables nuevos métodos de fabricación que no podrían realizarse sólo bajo control manual.

más eficiente, ciertos procesos consumen, inevitablemente, gran cantidad de energía. Se está consiguiendo, sin embargo, un ahorro global notable gracias a que los sectores de la industria que están creciendo son los que consumen menos energía por unidad de producción. Desde 1971, este cambio en la composición de la producción ha contribuido en un 15 por ciento de la disminución del 35 por ciento que ha experimentado el consumo de energía por unidad de producción.

Las primeras etapas de la fabricación (la conversión inicial de las materias primas) son las más consumidoras. A modo de ejemplo, un fundidor de aluminio gasta 120 pesetas en energía por cada 100 que abona en salarios y capital; el fabricante de productos inorgánicos, como el oxígeno y el cloro, gasta 25 pesetas. (En comparación, el empresario de alimentos congelados paga sólo 5 pesetas en energía por cada 100 que destina a salarios y capital, y un fabricante de ordenadores gasta sólo 1,5 pesetas.)

Como las economías del mundo industrializado han trascendido la mera satisfacción de las necesidades básicas de sus ciudadanos, los productos que requieren poca energía en su fabricación comparado con su valor (ordenadores, instrumentos médicos y productos farmacéuticos) han representado una creciente proporción en la actividad económica. Se compran más equipos electrónicos que aparatos básicos, aunque, después de todo, hay un límite para el número de frigoríficos o automóviles que una familia puede absorber.

Además de crear nuevos artículos que requieren menos material y menos energía, los fabricantes elaboran sus productos habituales con menos cantidad de material. En las carrocerías de automóviles, las finas chapas de acero aleado de alta resistencia han sustituido a las chapas gruesas de acero convencional. La fibra óptica, del diámetro de un cabello, está reemplazando los haces de cobre del tendido telefónico. Hasta las hojas de papel son ahora más delgadas. El consumo relativo de los materiales principales (vidrio, acero, cemento, papel, abonos, cloro) está disminuyendo. También ha llegado a su tope el uso de plásticos.

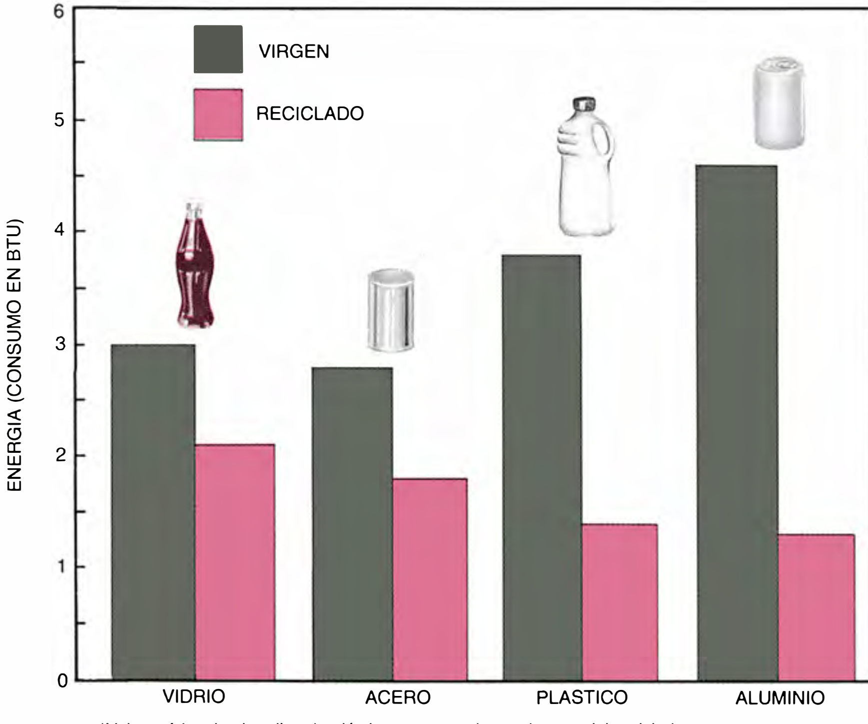
Si la "desmaterialización" de los artículos implica un ahorro en materias básicas, el reciclaje supone una drástica caída de la energía necesaria para producir éstas. El reciclaje viene a consumir, como mucho, la mitad de la energía que se gastaría para fabricar el mismo artículo a partir de materiales vírgenes. En los Estados Unidos sólo se fabrica alrededor del 20 por ciento de artículos de papel, plástico, vidrio y metales a partir de materiales reciclados, aunque se podría llegar al 50 por ciento. Los ahorros potenciales de energía son enormes.

Las empresas acostumbran a reciclar casi todos los residuos generados durante el proceso de fabricación; pero, cuando la partida pasa a manos de los consumidores, el porcentaje de material reciclado disminuye bruscamente. Sólo el 40 por ciento de las materias primas para la fabricación de acero proviene de material reciclado de fuentes exteriores a la fábrica. De forma similar, apenas la cuarta parte de la fibra de las papeleras procede del reciclaje y tan sólo una diminuta fracción de las materias primas para la fabricación de plástico consiste en productos utilizados ya.

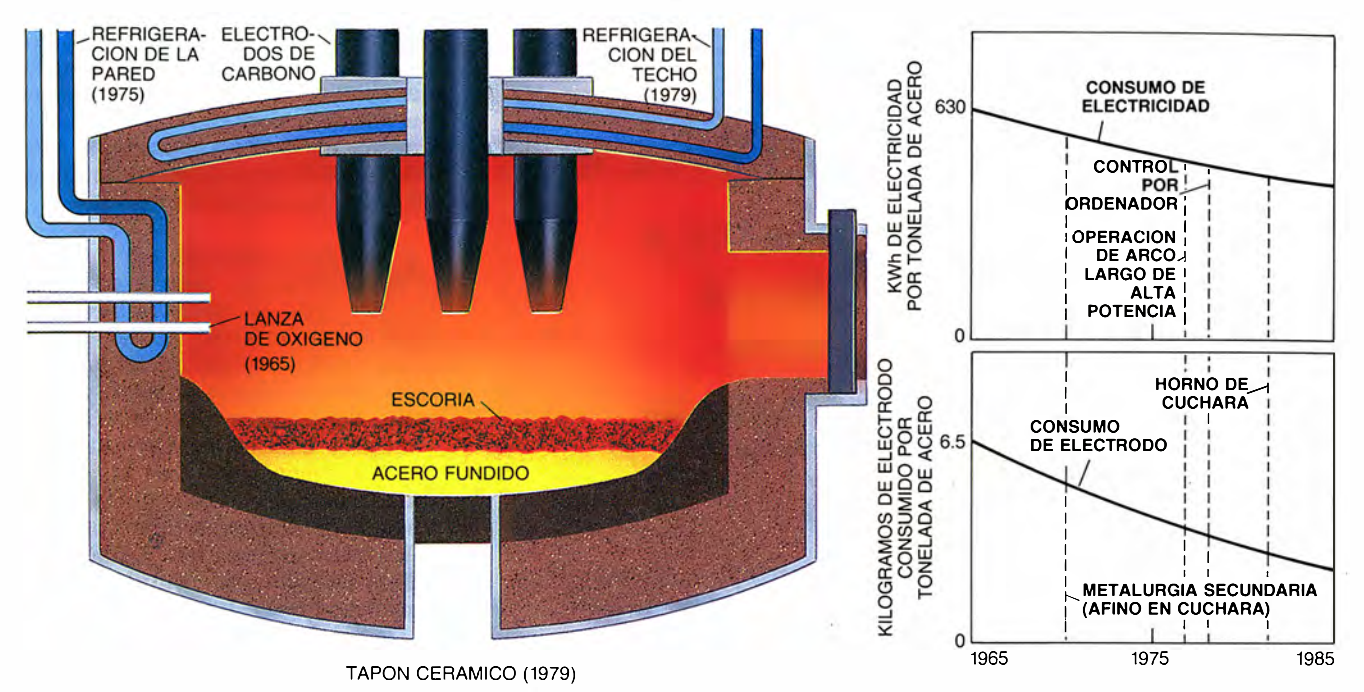
No es fácil hallar mercados de capacidad suficiente para absorber el aporte potencial de materiales reciclados. En realidad, la única demanda aceptable es la de aislante de celulosa procedente de periódicos viejos, madera sintética de plásticos reciclados o varillas de refuerzo de acero reciclado. El nuevo reto que se plantea es crear sistemas de reciclaje que elaboren productos de alto valor a partir de los residuos, por ejemplo, chapa de automóvil a partir de chapa de automóvil, o botellas de plástico a partir de botellas de plástico. Por ahora, el único esfuerzo destacable es el reciclaje de latas de aluminio, un producto de alta tecnología que consume más de un 50 por ciento de material reciclado.

A largo plazo, sin embargo, las transformaciones técnicas constituyen los principales factores para el recorte del consumo de la energía. Las mejoras de los procesos industriales hubieran alcanzado hace tiempo sus límites naturales de no haber existido innovaciones radicales. Por ejemplo, la disponibilidad de madera para mástiles de barco dejó de ser un problema con el desarrollo de los barcos de acero y las formas alternativas de propulsión. La preocupación por la potencia limitada de la rueda hidráulica condujo al desarrollo de la máquina de vapor.

Un ejemplo más reciente nos mostrará la interacción entre innovación radical y mejora de un proceso. El polietileno, que da cuenta de la tercera parte de los 18.000 millones de kilogramos de plástico producidos el año pasado en Estados Unidos, inició su vida comercial a principios de los años cuarenta. Se producía a altas



7. RECICLAR envases desechados consume bastante más energía que su llenado, pero mantiene un desahogado margen sobre su fabricación a partir de materias primas. El aluminio, que es el material que presenta mayor diferencia, va a la cabeza en el reciclado, pero el plástico, que ocupaba el segundo lugar, se ha visto ampliamente superado por el vidrio. (Ilustración de Johnson Yokogawa.)



8. LA MEJORA GRADUAL de un proceso disminuye los costes globales de producción, incluido el consumo de energía. Los hornos de arco eléctrico para fabricar acero (*izquierda*) han conseguido, desde 1965, ganancias energéticas totales de más de un 30 por ciento, gracias a una serie de avances en sus componentes. Dos medidas del rendimiento de un horno son la electricidad gastada por tonelada de acero y los kilogramos de electrodo consumido por tonelada de acero (*derecha*). Las reducciones de energía a largo plazo dependen de innovaciones radicales en los procesos.

presiones (12.000 atmósferas), pero a mediados de los setenta la energía necesaria para fabricar un kilogramo de polietileno se había reducido a la mitad. En el ínterin, en los años cincuenta, dos químicos europeos realizaron ciertos descubrimientos fundamentales que desembocaron en la creación de un proceso de producción enteramente nuevo, basado en disolventes. Gracias a los nuevos conocimientos, Union Carbide desarrolló en la década de los setenta un proceso para producir polietileno que trabajaba en fase gaseosa a baja presión. Mucho más sencillo y seguro, el nuevo proceso demanda sólo la cuarta parte de energía exigida por el proceso a elevada presión mejorado, cuesta la mitad y produce un polímero más resistente.

Algunos avances, como el proceso de producción de polietileno a baja presión, se apoyan en la combinación de técnicas preexistentes con nuevos hallazgos científicos. El esfuerzo mundial por desarrollar una nueva técnica que permita fabricar acero directamente de la mena y el carbón se basa en técnicas conocidas (en este caso, el convertidor básico de oxígeno, responsable de la mayor parte de la producción de acero).

En el proceso propuesto de fabricación directa de acero, la mena molida, el carbón, el oxígeno y los fundentes se inyectan dentro del convertidor, que contiene un baño de hierro fundido. Los óxidos de hierro se reducen a hierro, y se eliminan las impurezas en forma de escoria. Si cristalizara esta técnica, un sólo reactor que operase en continuo sustituiría cuatro procesos discontinuos (aglomeración de la mena en pellets, conversión del carbón en coke, reducción de la mena en un alto horno y producción de acero en un convertidor básico de oxígeno). Los costes disminuirían drásticamente, lo mismo que la agresión contra el entorno producida por los hornos de coke. Los ahorros energéticos del 25 por ciento podrían incluso elevarse.

Otros hitos industriales se debieron al descubrimiento de fenómenos científicos totalmente nuevos. La física cuántica y la invención del transistor condujeron al desarrollo de los microprocesadores. Estos minúsculos ordenadores convierten respuestas complejas de sensores físicos en medidas precisas de composición química, presión, tamaño y otras magnitudes. Los microprocesadores son la base del control automático de los procesos industriales. Los controles automáticos se han introducido en múltiples técnicas industriales de nuevo cuño, como el uso de robots en campos muy dispares, desde el montaje de automóviles hasta el análisis clínico.

En algunas ocasiones, el descubrimiento científico y la aplicación comercial se hallan tan estrechamente ligados que parecen evolucionar juntos. Muestras de este tipo son la interacción entre la química de los polímeros y el desarrollo de las fibras sintéticas (nylon, polietileno de cadena larga y kevlar) y la interacción entre la física del estado sólido y la electrónica.

Cualquier descubrimiento importante ofrece posibilidades antaño ignoradas. En particular, los nuevos conocimientos sobre biología molecular encierran un rico potencial. Las plantas genéticamente modificadas que fijan su propio nitrógeno del aire podrían eliminar el uso de abonos nitrogenados en algunos cultivos, como el maíz y el trigo. Aunque la adecuada manipulación de los cerca de 50 genes implicados puede necesitar décadas, el impacto energético y medioambiental sería enorme. La fabricación de esos fertilizantes consume el 2 por ciento de todo el gasto energético industrial; se les atribuye, además, la mayor parte de las emisiones humanas de óxido nitroso, un gas implicado en el efecto de invernadero.

El desarrollo tecnológico, para que tenga pleno éxito, debe ser compatible con la preocupación creciente por la calidad del entorno. A medida que la población mundial se va concentrando en las ciudades y consume más *per ca-*

pita, el problema ambiental adquiere mayor importancia. Las compañías que no atiendan a esas preocupaciones pueden salir perjudicadas con costes directos e indirectos, tales como pleitos, retrasos en proyectos y reclamaciones de sus propios empleados.

Aunque la reducción del consumo industrial de energía depende, en cada caso, de innumerables cambios y optimizaciones, no hay que olvidar la intervención de medidas de tipo político. En primer lugar, las mejoras deben basarse en unos sólidos cimientos educativos. La enseñanza de una buena ciencia en la escuela elemental y en el bachillerato es decisiva para futuras levas de científicos e ingenieros y para que los no científicos entiendan la contribución de aquéllos al bienestar social.

De parejo interés es la predisposición de la industria a emplear personal cualificado para optimizar el rendimiento energético. Las empresas deben tener márgenes adecuados de ganancias para invertir en investigación y desarrollo de nuevas técnicas. Debería fomentarse la competencia entre las compañías de cada sector industrial, así como la competencia entre industrias que satisfacen las mismas necesidades básicas. Por último, los directores de fábrica, los suministradores de equipos, las firmas de ingeniería y los entes gubernamentales implicados deberían fijarse horizontes a largo plazo.

La idea que el público tenía de la energía, nacida de la crisis del petróleo de los años setenta, ha quedado ya relegada. Es necesario adoptar un renovado consenso para estimular las ganancias que se necesitarán en los próximos decenios.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

LONG WAVES IN WORLD INDUSTRIAL PRODUCTION, ENERGY CONSUMPTION, INNOVATIONS, INVENTIONS, AND PATENTS, AND THEIR IDENTIFICATION BY SPECTRAL ANALYSIS. H. Haustein y E. Neuwirth en *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 22, n.º 1, págs. 53-89; 1982.

TAKE YOUR PICK: CAPITAL OR ENERGY. D. E. Steinmeyer en *Chemtech*, vol. 12, n.º 3, págs. 188-192; marzo de 1982.

ENERGY CONSERVATION IN THE PROCESS INDUSTRIES. W. F. Kenney. Academic Press, 1984.

PROCESS ENERGY CONSERVATION. D. E. Steinmeyer en *Encyclopedia of Chemical Technology*, volumen complementario. Kirk Othmer. John Wiley & Sons, Inc., 1984.


TAXI

Energía para vehículos de motor

Consumen un porcentaje creciente de las reservas de crudo y son una de las principales fuentes de contaminación. Mejores diseños, combustibles alternativos y transporte más racional ayudarán a resolver el problema

Deborah L. Bleviss y Peter Walzer

Alrededor de la mitad del consumo mundial de petróleo corresponde a una flota de 500 millones de vehículos cuya tasa de crecimiento supera, de manera persistente, la tasa de desarrollo demográfico. Esos vehículos dan cuenta de la mayor parte de la energía que se destina al transporte de personas y mercancías. Desde 1970, el incremento anual de la flota mundial es de un 4,7 por ciento en turismos y de un 5,1 por ciento en autobuses y camiones. Si estos porcentajes se mantienen en el futuro, mil millones de vehículos rodarán por las carreteras del mundo en el año 2030.

Este rápido crecimiento planteará muchos problemas. A largo plazo, el consumo de petróleo crecerá más rápido que la producción, agotando las reservas. De esta forma, el constante incremento en el precio del petróleo acabará con el mercado de compradores que emergió a comienzo de la década de los ochenta (cuando una ligera baja económica y los esfuerzos de conservación llevaron a una reducción transitoria de la demanda mundial de crudo). A medida que vaya subiendo el precio del barril, los países exportadores de Oriente Medio irán adquiriendo mayor peso político, promoviendo otra ola de tensiones políticas y económicas reminiscentes de las crisis del petróleo de los años 1974 y 1979, como se acaba de ver con la invasión de Kuwait por Irak.

1. CONGESTION DE TRAFICO en París, resultado del aumento desmesurado del número de automóviles y camiones. Además de acelerar el proceso de agotamiento de las reservas de petróleo, ese crecimiento degrada la atmósfera y fomenta el efecto de invernadero. Los embotellamientos que inmovilizan los vehículos durante tiempo suman, al derroche, la contaminación.

No menos inquietante es la repercusión del incremento del parque automovilístico en el entorno, local y mundial. La contaminación regional del aire perjudica la salud, y una parte importante de las emisiones contaminantes se deben a los vehículos de motor. Los tres principales componentes de los gases emitidos por los motores de combustión son: monóxido de carbono (que desplaza el oxígeno de la sangre), óxidos de nitrógeno (que reaccionan con el agua creando ácido nítrico) e hidrocarburos (que reaccionan con los óxidos de nitrógeno en presencia de la luz solar, creando ozono, que en altas concentraciones puede irritar los pulmones). En los países occidentales industrializados y Japón —estados miembros de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE)—, los vehículos de motor emiten cerca de la mitad de óxidos de nitrógeno, dos tercios de monóxido de carbono y casi la mitad de hidrocarburos. En los países en vías de desarrollo, los controles medioambientales mucho menos rígidos y motores con mucho menos control de sus emisiones de escape contribuyen significativamente a la contaminación, aun cuando numéricamente sean pocos los que estén en las carreteras.

Las emisiones de los vehículos agravan los problemas relativos al entorno. Un depósito de gasolina puede producir, en casos extremos, hasta 160 kilogramos de dióxido de carbono, el principal gas implicado en el efecto de invernadero. Aunque todos los motores de los vehículos que ahora mismo hay en el mundo producen sólo el 14 por ciento del total del dióxido de carbono emitido por los combustibles de origen fósil, su contribución a la contaminación en los países industrializados es mayor. Otros gases responsables del efecto de invernadero son los halocarburos, que se están sustituyendo por otros gases en los sistemas de aire acondicionado de los automóviles.

La mayor parte de los vehículos de motor se fabrican en un país de la OCDE o se fundan en diseños originales de uno de estos países. Por eso, las políticas para conservar la energía mundial y reducir las emisiones de los vehículos deben concentrarse en las naciones industrializadas. Medidas que habrán de desarrollarse conjuntamente, pues cuando otros factores se mantienen constantes una rebaja en el consumo produce una reducción en las emisiones de los tubos de escape. Esta relación se ha demostrado cuando las administraciones han puesto límites de velocidad. Tales restricciones suelen ser impopulares y costosas: el crecimiento económico depende del transporte.

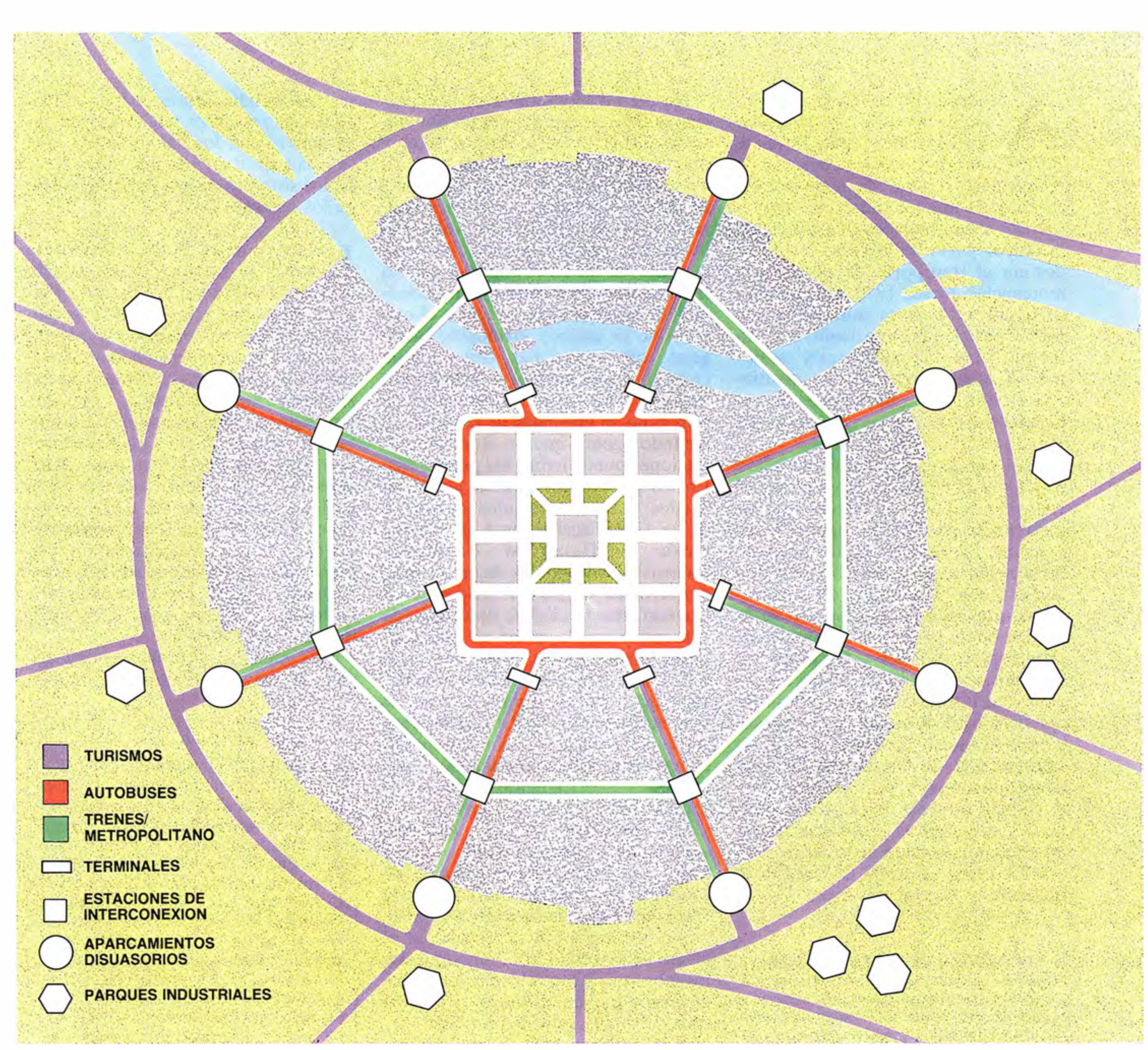
Hay medidas alternativas que gozan de mayor atractivo. Se puede

DEBORAH L. BLEVISS y PETER WALZER se dedican al estudio de la técnica y la política de la energía para vehículos de motor. Bleviss dirige el Instituto Internacional para la Conservación de la Energía con sede en Washington. Licenciada en física por la Universidad de California en Los Angeles, completó su formación en la de Princeton. Walzer es jefe del centro de investigación y desarrollo de Volkswagen A. G. y profesor en la Universidad Técnica de Aquisgrán. Estudió económicas e ingeniería aeronáutica y recibió el doctorado en ingeniería en la Universidad de Aquisgrán en 1970. Es vicepresidente responsable del Area Técnica de SEAT.

aprovechar mejor el consumo de la gasolina, introducir combustibles más limpios, crear una buena red viaria, promover el transporte colectivo y fomentar que los trabajadores vivan cerca de sus lugares de trabajo. Cada una de estas soluciones presenta sus inconvenientes, pero podrán superarse si existe voluntad política de hacerlo.

Hasta ahora la mayoría de los pasos que se han dado, en lo que a reducción del consumo de petróleo se refiere, correspondieron al diseño de los coches de gasolina y diesel. En los últimos 15 años, la media de consumo de combustible de los vehículos de la hasta octubre Alemania occidental cayó en un 25 por ciento; en Estados Unidos, donde el nivel de consumo de partida era bastante mayor, el gasto de combustible se ha reducido a la mitad. La media de consumo en los países de la OCDE ronda los 7,5 litros por cada 100 kilómetros. Al mismo tiempo, las emisiones de los principales gases contaminantes urbanos han descendido sustancialmente, merced a una mejor combustión y al uso de catalizadores, que transforman el monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos en dióxido de carbono, nitrógeno y agua.

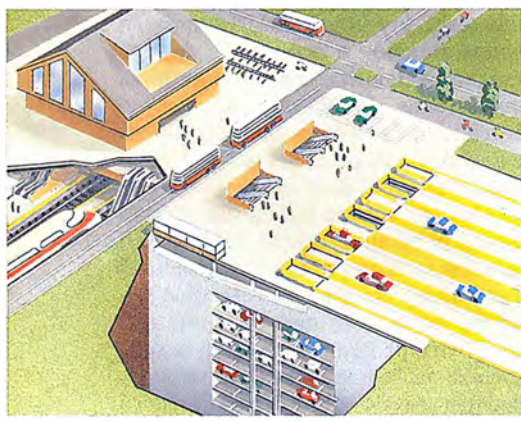
Las mejoras introducidas en los turismos son, en su mayoría, aplicables a los camiones de menos de 4500 kilogramos de tara. Esa transferencia reviste particular interés en los Estados Unidos, donde los camiones ligeros representan alrededor de un tercio de las ventas de turismos. Los camiones ligeros circulan más kilómetros que los turismos y consumen más que ellos. Les corresponde cerca de la mitad del combustible destinado al transporte personal.

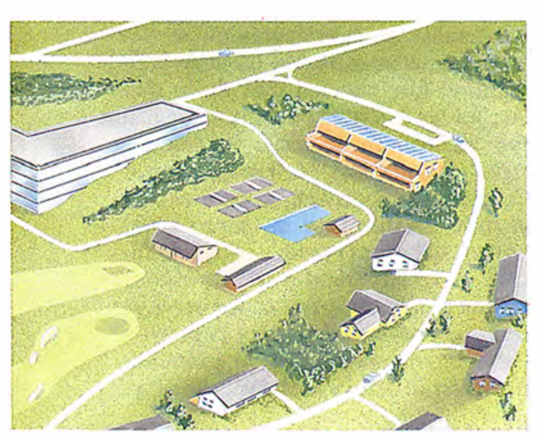


2. PLANIFICACION URBANA IDEAL para enlazar el centro con la periferia por rápidas autopistas y vías de tren (*izquierda*). Las terminales suburbanas cuentan con trenes y autobuses que siguen horarios continuos; a pesar de ello, algunos conductores llegan hasta el centro de la ciudad, donde existen aparcamientos disponibles (*arriba a la derecha*). Los suburbios se conectan con el transporte colectivo merced a aparcamientos en las

El consumo de carburante puede recortarse todavía más en cada proceso donde la energía química se transforma en mecánica y ésta, a su vez, en fuerza motriz del vehículo. El derroche comienza en el motor; aquí, parte de la energía se pierde en rozamientos internos, en calor y en otros factores. En la etapa siguiente, de transmisión y tren de rodadura, la mayor parte de la potencia del vehículo se la lleva el rozamiento entre los elementos. Por último, la energía se utiliza en vencer la resistencia al rodamiento propiamente dicho y la resistencia aerodinámica.







estaciones, que son automáticos y subterráneos (*en el centro*). Se eliminan viajes instalando el lugar de trabajo cerca de las viviendas (*abajo*).

Hay medios técnicos que permiten reducir la pérdida de energía en cada fase. Pero las soluciones varían de un sitio a otro, en función de las distintas políticas empleadas por cada gobierno y en función de las preferencias de los consumidores. La inyección directa en los motores diesel, por ejemplo, mejora el rendimiento de los diesel tradicionales, mezclando el combustible y el aire directamente en la cámara de combustión, en vez de hacerlo en una precámara, tal y como hacen los motores diesel convencionales. Igual que todos los diesel, el motor emite sustanciales cantidades de partículas en suspensión; por eso, el futuro de la inyección directa parece más oscuro en Estados Unidos que en Europa.

Otros diseños ofrecen mayor eficacia; así, el motor de carga estratificada, que está despertando un renovado interés en Japón. En este motor, la inyección precisa de combustible crea una rica mezcla de combustible y aire cerca de la bujía para que ésta provoque el encendido; establece también una mezcla pobre en el resto de la cámara de combustión. Tales motores son capaces de reducir el consumo de combustible en un 20 por ciento, en comparación con los tradicionales de gasolina. Sin embargo, la excesiva riqueza en oxígeno de los gases de escape no permite un correcto funcionamiento de los convertidores catalíticos, impidiendo la transformación de los óxidos de nitrógeno en nitrógeno; por ello, los motores de carga estratificada aún no superan los controles de emisiones de escape.

Una aplicación particularmente interesante de los motores de carga estratificada, que está mereciendo atención mundial, es un moderno motor de dos tiempos. Los viejos modelos de este diseño compacto se habían rechazado habitualmente por su contaminación excesiva. Mas un cuidadoso control de la combustión promete hacerlos más limpios. Si el motor de dos tiempos cumple las normas de emisión, su ligero peso le dotará de una gran atracción.

La segunda etapa donde se pierde energía se centra en la transmisión. El reto consiste aquí en mantener el motor en su régimen de máxima eficacia —carga máxima— el tiempo que sea posible, respetando, a la vez, los deseos de velocidad que el conductor haya especificado. El funcionamiento a plena carga —cuando el motor se utiliza con total rendimiento— es muy eficiente; el funcionamiento a carga parcial (al ralentí, por ejemplo) es sumamente derrochador. Se podría trabajar casi siempre a plena carga añadiendo más velocidades en la caja de cambios, o activándolas en sus regímenes óptimos de operación la mayor parte del tiempo, con la ayuda de un ordenador. Alternativamente, se puede ofrecer el equivalente a una infinita caja de velocidades, lo que se ha venido en denominar cambio variable continuo, mediante la transmisión de la potencia a través de un mecanismo de correa u otros ingenios de variación continua. A pesar de que el cambio variable continuo lo incorporan ya algunos modelos, sólo lo aprovechan vehículos de pequeño tamaño. Algunas compañías automovilísticas están estudiando la posibilidad de aplicarlo en vehículos mayores.

Se pierde también energía en vencer la resistencia por rozamiento que opone el pavimento y la resistencia del vehículo a la aceleración. Este tipo de pérdida es directamente proporcional al peso; así, una reducción de unos 80 kilogramos en el peso de un vehículo aportaría un ahorro de combustible de un 5 por ciento. La reducción de peso de un vehículo se consigue en la remodelación del diseño y en la sustitución de materiales pesados por otros más ligeros.

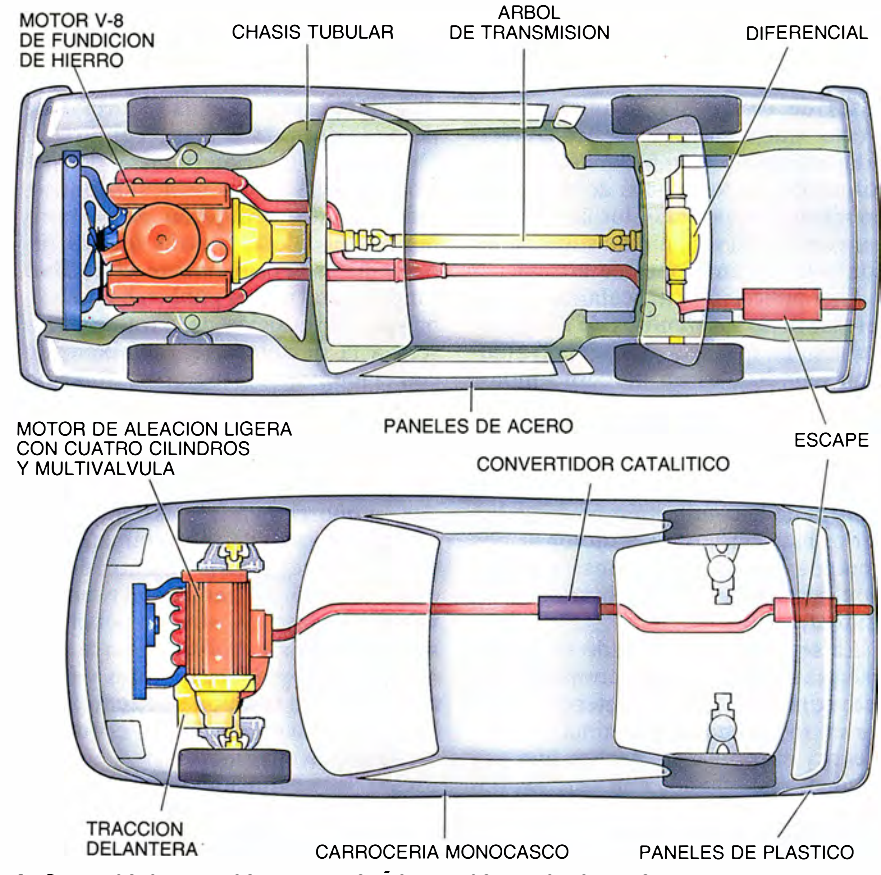
Enseña la historia que la mayoría de los avances en la reducción de peso vinieron de la mano del diseño. Después de la primera crisis del petróleo, en 1973, los vehículos de Estados Unidos redujeron peso suprimiendo las aletas y otras formas ornamentales. Posiblemente el cambio fundamental que el público ha notado ha sido la transición de la tracción trasera a la delantera, en combinación con el montaje del motor en situación transversal. Esta configuración evita la necesidad de situar un túnel a lo largo del habitáculo (por donde pasaba la transmisión), que lo dividía en dos, proporcionando más espacio interior a los vehículos de tamaño pequeño y medio. Este diseño se está empezando a aplicar también en los vehículos mayores, aunque deben resolverse algunos problemas en la acomodación de grandes motores y en la aportación de tracción suficiente. Los futuros cambios de diseño economizarán el peso del motor.

Con la sustitución del acero por materiales ligeros disminuimos el peso del vehículo en unos 50 kg. En Europa, la preocupación por el reciclaje de los plásticos ha hecho que los constructores pongan más interés en el empleo de aluminio y aceros de alta resistencia que en aquéllos.

La resistencia aerodinámica, otra fuente de rozamiento, crece exponencialmente con la velocidad del vehículo (como lo hace el ruido del viento, para desagrado de los pasajeros). Este problema se comenzó a plantear en Europa, donde los límites de velocidad son más altos que en Estados Unidos y Japón. Hoy, sin embargo, los constructores de todo el mundo muestran un gran interés por los diseños aerodinámicos porque conservan la energía de una manera barata y con elegancia.

El potencial para la mejora en el ahorro de combustible es grande, como lo evidencia el número de vehículos experimentales desarrollados, fundamentalmente en Europa, a finales de los años setenta y a lo largo del decenio siguiente. Pensados esos vehículos para el ahorro de energía, se necesita seguir trabajando en otros frentes (seguridad, protección medioambiental y prestaciones) que propicien su fabricación en serie. De cualquier modo, esos coches muestran que el empleo de materiales ligeros, motores de nuevo diseño, avances en la transmisión y otros factores pueden mejorar bastante la economía de combustible de cada unidad.

Un pequeño motor diesel de dos cilindros, equipado con un avanzado sistema de inyección, impulsa al Eco-Polo de Volkswagen, un vehículo experimental diseñado para uso urbano. Este vehículo incorpora un nuevo aparato, denominado piloto automático, que detiene el motor cuando el vehículo está decelerando o cuando está parado, y que lo vuelve a poner en marcha automáticamente cuando el conductor pisa el acelerador. Estas características le permiten una alta economía, que en el ciclo ciudad-carretera llega a los 3,8 litros por cada 100 kilómetros, más o menos la mitad que la mayoría de los coches europeos. El Eco-Polo emplea un filtro de escape y un aditivo especial, de hierro, para eliminar las partículas que genera la combustión diesel. Consecuentemente, la emisión de partículas es inferior a las establecidas por las leyes de California, las más estrictas del mundo. Debe, sin embargo, advertirse que la seguridad de dicho aditivo no ha recibido todavía la aprobación de los entes de protección ambiental.



3. CAMBIOS OPERADOS EN EL DISEÑO DE LOS AUTOMOVILES para ahorrar energía. El modelo prototipo de principios de los años setenta (*arriba*) era grande, con motor de hierro, tracción trasera, paneles laterales de acero y un chasis como estructura principal. Hoy, ese coche tiene un pequeño motor multiválvulas construido en aluminio, tracción delantera compacta, paneles de plástico y carrocería monocasco. Gracias a esas innovaciones, la eficacia del vehículo se ha doblado.

El Volvo LCP 2000 es uno de los vehículos experimentales de bajo consumo de combustible más insólitos: desde el principio se desarrolló pensando con criterios de consumidor y productor. Fue diseñado para asegurar que los pasajeros no sufran daños en un golpe frontal a 56 kilómetros por hora. Además, podrá ensamblarse mediante componentes modulares. Este montaje fácil podría compensar buena parte del costo adicional de utilizar tecnologías y materiales avanzados que permitirían consumir 3,8 litros y 2,9 litros por cada 100 kilómetros, en ciudad y autopista, respectivamente.

Estos vehículos experimentales demuestran que el ahorro de combustible puede aumentar sustancialmente, si bien con un elevado costo y complejidad técnica. Cabe incluso mayor economía sacrificando parte del confort y de las prestaciones del vehículo. Las condiciones de orden contable, sin embargo, han desanimado a los fabricantes de aplicar en el comercio sus ideas de ahorro de combustible mediante la producción de modelos especiales de "ahorro de combustible". Cuando el precio del combustible cae, los consumidores prestan menos atención a economías de este tipo para exigir más confort o mejores prestaciones. Al mismo tiempo, el mercado del petróleo, inmediatamente anterior a la crisis del golfo Pérsico abierta en el último agosto, provocó que los gobiernos perdieran interés por los programas que se iniciaron en los años setenta para promocionar el desarrollo y compra de vehículos eficientes en el consumo de combustible. (Estos programas incluían la subvención de la investigación y el establecimiento de objetivos ahorradores.)

Además, los fabricantes no se decidirán a sacar modelos de muy bajo consumo que cuesten más de lo que los clientes estén dispuestos a pagar o que incorporen técnicas incómodas para los usuarios. Volkswagen, por ejemplo, no abordaría la fabricación en serie de su motor de piloto automático sin antes sondear la aceptación, entre sus clientes, de un motor de funcionamiento intermitente. Los usuarios podrían rechazar esa propiedad si ello comporta merma en la sensación (si no en la realidad) de seguridad.

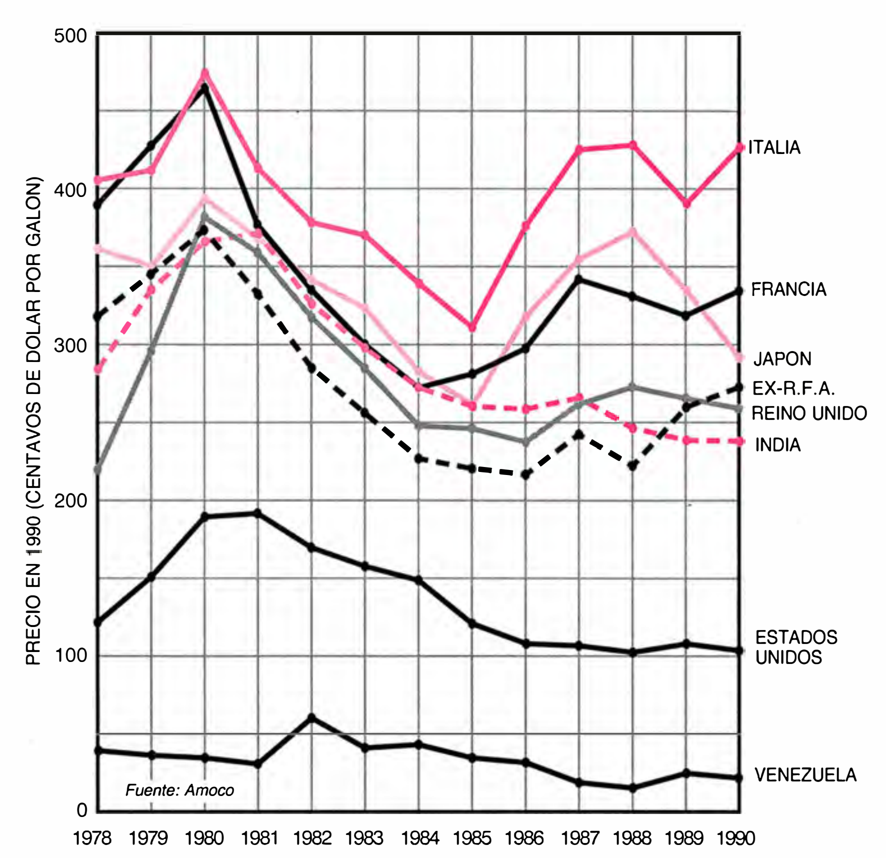
Los avances en el ahorro de combustible no resuelven, por sí solos, los problemas de disponibilidad de petró-

leo y de aire limpio. A largo plazo, resulta de parejo interés el uso de combustibles alternativos, preferiblemente aquellos cuya producción y combustión no añadan más dióxido de carbono a la atmósfera. Sólo tres combustibles cumplen este criterio ideal: hidrógeno (si se produce de fuentes renovables), biomasa (que consume tanto dióxido de carbono durante la reacción fotosintética como el que produce durante la combustión) y electricidad (si ésta se genera sin la utilización de combustibles fósiles).

Los tres son, todavía, inviables. El hidrógeno tiene poca capacidad energética, lo que limita la autonomía y carga útil de los vehículos con motores de hidrógeno. Estos ven también recortada su capacidad de aceleración, debido a la escasa potencia. Además, no es fácil almacenar y distribuir el hidrógeno. Daimler-Benz y BMW están trabajando en vehículos con motores de hidrógeno, pero no esperan poder sacarlos al mercado hasta bien entrado el próximo siglo.

Los vehículos eléctricos tienen también baja capacidad de energía y potencia, además de la desventaja de un largo período de recarga. Pero funcionan silenciosamente, no gastan combustible cuando están parados y pueden recuperar algo de la energía que se pierde al frenar, usando el motor eléctrico como generador (proceso llamado "frenado regenerativo"). A pesar de los problemas que rodean a los vehículos eléctricos, van ganando en interés para el tráfico urbano, al no contaminar en absoluto. Varias compañías ofrecen ya vehículos y furgonetas eléctricos, aunque se supone que se limitarán al pequeño segmento del mercado donde no sean factores primordiales las largas distancias recorridas y la rápida recarga de combustible.

El etanol (alcohol de caña) es el principal combustible procedente de la biomasa, al que las actuales condiciones del mercado hacen bastante más caro que la gasolina. En los Estados Unidos, el etanol es producido a partir de maíz, para uso como aditivo en la gasolina. En Brasil, el etanol se obtiene a partir de la caña de azúcar y se mezcla con agua para obtener hidróxido de etanol. En el momento más alto del programa, el 90 por ciento de los coches nuevos vendidos en Brasil incorporaban un motor de etanol, pero su producción ha caído vertiginosamente en los últimos años, debido sobre todo a dificultades financieras. Si los procesos



4. VARIACION DEL PRECIO DE VENTA de la gasolina en razón de la diferencia de impuestos que aplica cada país. Los impuestos sobre la gasolina en los Estados Unidos son los más bajos de los cinco países industrializados. Venezuela, exportador de petróleo, tiene el precio de la gasolina próximo al coste de producción; India, país importador de petróleo, impone un gravamen alto.

reales de conversión de la biomasa en alcohol adquiriesen un rendimiento superior, el etanol y el metanol (alcohol procedente de la madera) resultarían más económicos. En esa línea, algunos países europeos están investigando el uso de aceite de colza como combustible alternativo.

Desafortunadamente, el uso generalizado de combustibles procedentes de la biomasa está limitado por la superficie ocupada por los recursos que la producen. Europa y Japón carecen de suelo suficiente para promover grandes extensiones de biomasa susceptible de ser transformada en combustible.

Otros analistas proponen la adopción de tecnologías de transición, a la espera del perfeccionamiento de la técnica en la utilización de hidrógeno, electricidad y biomasa. En los Estados Unidos, se ha puesto considerable atención en el metanol, que puede obtenerse a partir de gas natural o de carbón. El metanol, que genera menor cantidad de emisiones perjudiciales que la gasolina, puede producirse a partir de recursos propios, reduciendo así la dependencia de EE. UU. respecto del crudo importado.

Los críticos argumentan que el metanol producido a partir del gas natural no genera menos dióxido de carbono que la gasolina, y que las reservas nacionales de gas se agotarían rápidamente. El carbón, continúan objetando, puede convertirse en metanol, pero a costa de altas emisiones de dióxido de carbono. Los partidarios dicen que los motores diseñados para consumir metanol como combustible ofrecen mayores posibilidades de progreso que los de gasolina (capacidad de operar con relaciones de compresión muy altas, jamás intentadas con anterioridad). Afirman también que la biomasa, mejor que el gas natural, podría constituirse en reserva renovable de metanol.

Se aprovecharía quizá mejor la energía que el gas natural contiene si se quemara directamente como combustible y no hubiera que transformarlo en metanol. La verdad es que en Nueva Zelanda, Italia y otros países, hay automóviles que consumen gas natural. Este combustible —que en su mayoría está compuesto por metano— produce alrededor del 20 por ciento menos de gases de invernadero que la gasolina (para cantidades equivalentes de dióxido de carbono). Mas, por su baja densidad

energética, el gas natural precisa almacenarse bajo compresión, en pesados y voluminosos depósitos, que limitan la autonomía del vehículo y su capacidad de carga. Además, los sistemas de distribución de combustible están preparados para líquidos y habría que acometer cambios fundamentales en habilitarlos para gas natural.

Otra salida de compromiso sería la combinación del uso de gasolina y electricidad en un mismo vehículo, para así aprovechar sus respectivas ventajas de potencia y limpieza. Volkswagen ha diseñado un "híbrido" tal. Este prototipo está dotado de un motor diesel y un pequeño motor eléctrico, con baterías de sodio y azufre (que operan a 300 grados Celsius), y un embrague que une los dos motores. Cuando el acelerador se presiona en menos de un tercio de su recorrido total —como sucede habitualmente en el tráfico urbano— el motor eléctrico mueve el vehículo. Bajo una mayor presión sobre el pedal, el embrague se acciona y el motor eléctrico —que ahora se transforma en el volante de inercia del motor— arranca la mecánica diesel. Mientras está actuando el motor de combustión, el motor eléctrico puede servir como generador, recargando así las baterías. Cuando se hace el recorrido mixto de ciudad y autopista, típico en Europa, el híbrido de Volkswagen gasta por cada 100 kilómetros alrededor de 2,3 litros de combustible y 25 kilowatt hora de electricidad. Si la energía eléctrica se obtiene a partir de otras fuentes que no sean combustibles fósiles, se elimina el 60 por ciento de las emisiones de dióxido de carbono que normalmente emite un vehículo de similar tamaño.

Hay levantadas muchas barreras que se oponen al rápido desarrollo de nuevas tecnologías y la adopción de combustibles alternativos. La mayor, la ignorancia. Nadie conoce en qué consistirán las futuras técnicas. Ante ese panorama ningún fabricante está dispuesto a comprometerse en usar combustibles alternativos o en idear motores que los puedan utilizar. Otro obstáculo es el coste de los combustibles alternativos, mucho mayor todavía que el precio del petróleo. Pero la premura por controlar la contaminación de algunas ciudades podría instar la experimentación a gran escala con nuevos vehículos y nuevas fuentes de energía.



5. MOTOR DE DOS TIEMPOS desarrollado por Orbital Engine Company de Australia. Es tan compacto, que deja suficiente espacio en el compartimento motor para que quepa un hombre. Si el diseño cumpliera las normas relativas al control de emisiones, ayudaría a ahorrar combustible.

Hasta ahora, nos hemos concentrado en vehículos y combustibles. Las posibilidades de ahorro energético y merma de la contaminación no acaban ahí. Los propios sistemas de transporte pueden transformarse. Carreteras, zonas de aparcamiento y estructuras de tráfico regional, mejor trazadas, podrían evitar la congestión y hacer innecesario el desplazamiento diario en vehículo al trabajo. La congestión del tráfico, amén de molesta, constituye una pérdida de combustible y un incremento de la contaminación atmosférica.

El proyecto más famoso para mejorar la circulación y la seguridad se llama PROMETHEUS; está financiado por fabricantes europeos. Una fase piloto del mismo se está ensayando ahora mismo en Berlín, donde hay instalados 200 semáforos dotados de transmisores infrarrojos cuyas señales pueden ser recibidas por una flota experimental de 900 vehículos. Al inicio del recorrido, el conductor indica al ordenador cuál es el punto de destino deseado. Cada vez que el vehículo pasa delante de uno de los semáforos dotados de emisor, el ordenador recibe información sobre las condiciones del tráfico que, una vez procesada, permite indicar la ruta más rápida para llegar al destino. Los resultados de este experimento aparecerán a finales de año.

La puerta está abierta a sistemas avanzados. La electrónica podría acelerar las reacciones del conductor,

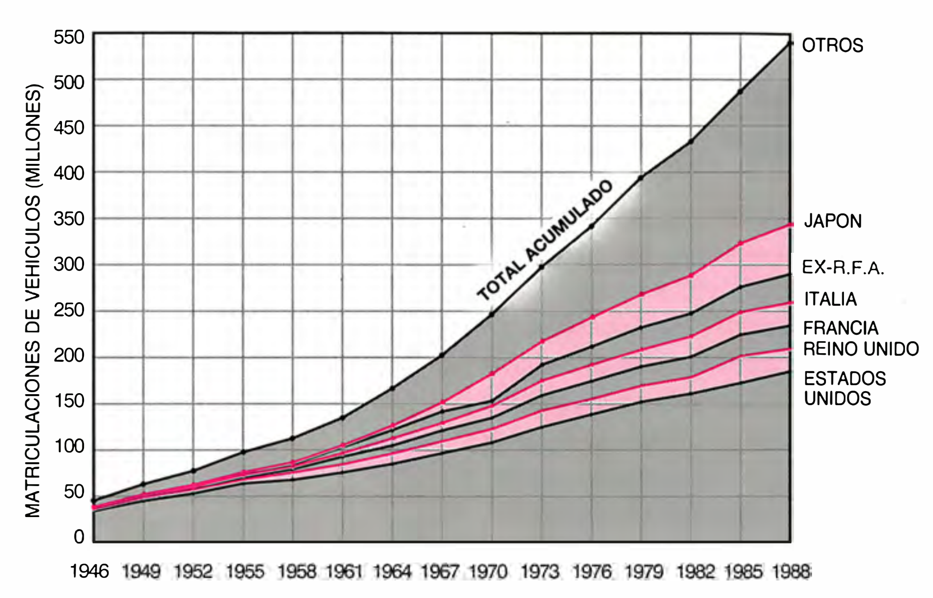
permitiéndole mantener menores distancias de separación entre vehículos, sin comprometer con ello la seguridad. Cabrían así más vehículos en las carreteras, sin interrumpir el flujo normal. Esta facilidad de movimiento economizaría hasta el 20 por ciento del combustible consumido y doblaría, si no triplicaría, la capacidad de tráfico de las carreteras.

La congestión se aliviaría limitando los aparcamientos en el centro de las ciudades, habilitando otros en el extrarradio, desde donde se llegaría al trabajo en un medio colectivo. Podría acortarse, también, la distancia entre lugar de residencia y el de trabajo. A medida que crece la población urbana, la gente se ve obligada a vivir lejos del trabajo, en muchas ocasiones más allá del alcance de los medios de transporte colectivo. Si las industrias y empresas comerciales se instalaran cerca de los lugares donde viven sus empleados, la distancia vivienda-trabajo se reduciría notablemente. Holanda, que está experimentando en esta vía, ha promulgado leyes que prohíben en algunas zonas edificios comerciales o residenciales, si caen lejos de terminales de transporte público.

Finalmente, la sustitución parcial del automóvil por el transporte colectivo rebajaría el consumo de energía por persona. Cierto es que no todos los países pueden explotar el transporte colectivo de igual manera. En los Estados Unidos, por ejemplo, sólo el 6 por ciento de todas las personas que viajan utilizan el transporte colectivo; la generalización del sistema sería muy costosa en relación a la cantidad de energía que se ahorraría. En efecto, aun cuando el tamaño de su sistema de transporte público fuera el triple del actual, y desplazara el mismo porcentaje de pasajeros que los servicios públicos de Europa, e incluso la nueva capacidad rindiera al máximo, la energía sin consumir por los vehículos privados sólo significaría un ahorro del 10 por ciento.

Por contra, en Alemania y en Japón la infraestructura del transporte público sí está muy desarrollada y las distancias entre ciudades son relativamente pequeñas. Puesto que ambos países quieren beneficiarse aún más de las mejoras del sistema, están investigando el desarrollo de trenes que circulen a más de 320 kilómetros por hora.

El sistema de transporte público generalizado funciona sólo si resulta más ventajoso para el usuario que conducir. Las presentes condiciones, sin embargo, refuerzan la preferencia por los vehículos privados. El transporte público es en ocasiones inaccesible, poco confortable y a veces peligroso. Además, trenes y autobuses circulan a intervalos exasperantes, en particular fuera de las horas punta.



6. FLOTA MUNDIAL de vehículos de motor: se ha multiplicado por 12 desde 1945, incrementando el consumo de combustible y la tasa de contaminación. El crecimiento mayor lo han registrado los países industrializados; en el futuro se dará en los países en vías de desarrollo y de Europa oriental.

El uso compartido de vehículos constituye una de las opciones de ahorro de energía que ofrece el transporte público y aporta también la flexibilidad del uso del vehículo privado. Esta opción reviste particular interés en países en que, como los Estados Unidos, los vehículos transportan una media de 1,7 personas. Si todos los pasajeros viajaran en vehículos compartidos, a una media de cuatro ocupantes por automóvil, el consumo de gasolina bajaría en un 45 por ciento. Sin embargo, mientras el combustible sea barato, habrá que ofrecer incentivos adicionales para promover el uso compartido del automóvil. En la ciudad de Washington, por ejemplo, se han reservado carriles rápidos en las autopistas para los vehículos ocupados por al menos tres personas. Gracias a esa medida, la demanda es tan fuerte que, con frecuencia, los conductores que viven en las afueras de la ciudad forman colas en puntos estratégicos donde esperan recoger pasajeros suficientes para poder tomar los carriles rápidos.

Caminar o montar en bicicleta es otra atractiva alternativa a conducir. Se ahorra energía, no se produce contaminación y tampoco se emite dióxido de carbono al medio ambiente. Pero los viajes de "tracción humana" encuentran fuerte resistencia, sobre todo si la seguridad y el confort están en juego. En la mayoría de las regiones urbanas de los países de la OCDE, los ciclistas se ven obligados a circular con el tráfico motorizado o tienen asignadas vías especiales sin ningún tipo de protección especial. En las áreas suburbanas, los peatones carecen frecuentemente de aceras y de pasos cebra.

En Holanda, uno de los países más densamente poblados de la OCDE, se ha trabajado en serio para crear incentivos al uso de la bicicleta. El gobierno ha reservado vías para ciclistas y aparcamientos de bicicletas, ha establecido alquileres de bicicletas en las estaciones de tren y permite a los pasajeros introducir sus bicicletas en los trenes. Merced a todo ello, el 9 por ciento usa ese medio de transporte para dirigirse a su trabajo. En algunas ciudades, esta cifra se eleva hasta más del 40 por ciento.

Si bien el mayor número de vehículos en circulación se encuentra hoy en los países de la OCDE, es muy posible que en los próximos 50 años el mayor incremento del parque ocurra en los países del este de Europa y en los que se encuentran en vías de desarrollo. Hay muchas razones para mantener el probable incremento de consumo de crudo tan bajo como sea posible. Países que no poseen petróleo tendrán que invertir su escasa reserva de divisas en comprarlo; países que ahora lo exportan deberán retraer una parte para su mercado interior en expansión. En ambos casos, mermará el capital destinado para el desarrollo y aumentará seguramente

la deuda externa. Al mismo tiempo, la calidad del aire en estos países se verá indudablemente deteriorada, como lo está ahora mismo en muchas ciudades del mundo desarrollado, atestadas de tráfico.

Los países en vías de desarrollo tienen una ventaja decisiva sobre los países ya industrializados: pueden ver muchos problemas de una industrialización sin programar antes de que resulten irresolubles. Puesto que los países en desarrollo todavía no han institucionalizado el transporte privado en la misma proporción que los países de la OCDE, se hallan a tiempo de crear sistemas de transporte público que la gente prefiera usar.

Curitiba, capital del estado de Paraná, en el sudeste de Brasil, es un famoso modelo de cómo la planificación puede evitar el excesivo consumo de combustible y la congestión del tráfico. El sistema de transporte ciudadano está resuelto con cinco líneas periféricas de autobuses, que circulan por vías reservadas para ellos. Estas arterias están conectadas por líneas interdistritos y todo el sistema está unido a las zonas periféricas por líneas secundarias. Las ordenanzas municipales han promovido el establecimiento de hogares y negocios cerca de las paradas de autobús. Como resultado, Curitiba disfruta de una de las tasas más altas de vehículos por habitante y una de las más bajas de consumo por vehículo de todo Brasil. Un segmento bastante extenso de la población dispone de vehículo propio, pero en su mayoría prefiere el transporte público para el desplazamiento diario.

Mas, a pesar de la demanda imperiosa de transporte colectivo, aumentará la solicitud de coches en las naciones de Europa oriental y en los países en vías de desarrollo, pero no lo hará con la rapidez experimentada en los industrializados. Resulta crucial, pues, que los automóviles que importen ofrezcan el mayor nivel de rendimiento. Y, a medida que ellos mismos vayan instalando fábricas de automoción, se hará preciso que los modelos allí creados sean sumamente eficientes.

El mayor consumo de energía por los sistemas de transporte del este de Europa y de los países en vías de desarrollo irá inevitablemente unido a un deterioro en la calidad del aire y a un desequilibrio en la balanza de pagos. Por ello, muchos países están considerando la posibilidad de desarrollar combustibles nacionales alternativos al petróleo, a imagen del Brasil cuando, a finales de los años setenta, los elevados precios del petróleo y el hundimiento de los precios del azúcar se comieron su reserva de divisas.

A pesar de que la mayoría de los países en vías de desarrollo no disponen de una reserva de biomasa comparable con la de Brasil ni podrían producir suficiente combustible para abastecer su parque móvil, la biomasa podría, sin embargo, reemplazar un porcentaje sustancial de las importaciones. Además, algunos países poseen reservas sin explotar de gas natural. Thailandia, Indonesia y Argentina, por ejemplo, están experimentando con prototipos que utilizan el gas natural que extraen. Sin embargo, antes de poner en marcha cualquier programa de uso de combustibles alternativos deben valorarse cuidadosamente todos los riesgos y beneficios.

De cualquier forma, el esfuerzo de replantear los sistemas de transporte debe empezar en los países de la OCDE, que crearon los problemas de gasto de energía e incremento de la contaminación. Este esfuerzo debe concentrarse primeramente en los vehículos ligeros, que se llevan la mayor parte del consumo de la energía destinada al transporte. Los progresos en este sector sólo se lograrán con la colaboración de los gobiernos nacionales. Los miembros de la OCDE podrían dar el primer paso firmando un protocolo de bajas emisiones de dióxido de carbono para los vehículos. Esa iniciativa serviría de ejemplo para los países donde el sector del transporte apenas empieza a despuntar.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

AHORRO DE COMBUSTIBLE EN VEHÍCULOS LIGEROS. Charles L. Gray, Jr., y Frank von Hippel en *Investigación y Ciencia*, n.º 58, págs. 8-20; julio de 1981.

PROCEEDINGS OF THE VECON '84 CONFERENCE ON FUEL EFFICIENT POWER TRAINS AND VEHICLES. Instituto de Ingeniería Mecánica, octubre de 1984.

ALTERNATIVE TRANSPORTATION FUELS: AN ENVIRONMENTAL AND ENERGY SOLUTION. Dirigido por Daniel Sperling. Quorum Books, 1989.

AUTOMOTIVE TECHNOLOGY OF THE FUTURE. U. Seiffert y Peter Walzer. SAE, 1990.

AN INDUSTRY VIEW: MARKET INCENTIVES. Robert G. Libertore en *Forum for Applied Research and Public Policy*, vol. 5, n.º 1, págs. 19-22; Primavera de 1990.

TECHNOLOGY AND FUEL EFFICIENCY. David L. Greene en *Forum for Applied Research and Public Policy*, vol. 5, n.º 1, págs. 23-29; Primavera de 1990.



Energía para el mundo subdesarrollado

Con un buen uso final de la energía y modestos incrementos en su capacidad de generación de la misma, los países en vías de desarrollo dispondrían de la cuantía que precisan sin dañar el medio ambiente

Amulya K. N. Reddy y José Goldemberg

De persistir las tendencias actuales, los países en vías de desarrollo consumirán dentro de veinte años tanta energía como los industrializados hoy. Y aún así, la diferencia de niveles de vida se ahondará todavía más. Tal insuficiente desarrollo no es simple resultado de la carencia de energía, como es costumbre suponer.

El problema estriba, en cambio, en que la energía no se consume ni equitativa ni eficientemente. Si los países en vías de desarrollo adoptasen las técnicas del máximo aprovechamiento de la energía, bastaría utilizar continuadamente un kilowatt *per capita* –lo que representa aproximadamente un 10 por ciento más del consumo actual– para elevar el nivel de vida medio hasta el que se disfrutaba en Europa occidental durante los años setenta.

La sorpresa que pueda provocar este dato se debe a que el mundo en vías de desarrollo presenta duros contrastes. Aunque las diferencias entre los distintos países subdesarrollados son ingentes, todos ellos se caracterizan por ser "sociedades duales", constituidas por pequeñas islas de opulencia que sobresalen en vastos océanos de indigencia. Las élites minoritarias y las masas pobres se diferencian tanto en sus ingresos, necesidades, aspiraciones y estilo de vida que, a todos los efectos, habitan en mundos distintos y separados. Consiguientemente, élites y masas dan a la energía muy diferentes usos. Las primeras emulan el estilo de vida de los países industrializados y se rigen por pautas de conducta similares en cuanto al consumo de energía, en gran parte orientado a fines suntuarios. La preocupación de los pobres, por el contrario, es encontrar energía suficiente para cocinar, abastecerse de agua y demás actividades esenciales para la subsistencia.

1. EL PROBLEMA de proporcionar más servicios energéticos (alumbrado y refrigeración, por ejemplo) en los países subdesarrollados puede resolverse reduciendo al tiempo la amenaza que para el ambiente suponen las actuales pautas de consumo. La clave reside en la incorporación de técnicas capaces de proporcionar servicios rentables. La electricidad puede constituir un portador de energía más idóneo que la leña.

En los países en vías de desarrollo, buena parte de la energía empleada en la agricultura, el transporte y las actividades domésticas procede de seres humanos y de animales de tiro. La energía procede también de otras fuentes, en especial de la biomasa, sea en forma de madera empleada como combustible, excrementos de animales o residuos agrícolas. De hecho, la fuente dominante de energía en las zonas rurales es la leña, siendo la cocina la actividad más consuntiva. Es frecuente que estas fuentes de energía biológica reciban la calificación de "no comerciales", pues no se compran; por ejemplo, es habitual en las zonas rurales que las mujeres y los niños recojan ramas y arbustos para la cocina, en lugar de comprar leña.

Dado que casi toda la población de los países subdesarrollados es pobre y depende en gran medida de fuentes de energía no comerciales, el consumo energético *per capita* es muy inferior al de los países industrializados. Incluso al tomar en consideración las fuentes no comerciales, el nivel total de servicios energéticos –calefacción, refrigeración, iluminación, fuerza motriz mecánica, etc.– sigue siendo muy inferior, a causa, sobre todo, del bajo rendimiento de los aparatos que finalmente se encargan de proveer los servicios.

Las grandes disparidades entre élites y masas, y entre el mundo industrializado y el subdesarrollado, han provocado una campaña intensa y generalizada tendente a elevar los niveles de recursos energéticos a que pueden acceder quienes carecen de ellos. Hasta la fecha, los líderes políticos han interpretado tales demandas como una obligación de multiplicar el consumo de energía comercial. La puesta en práctica de tal interpretación, sumada al crecimiento demográfico, ha provocado un crecimiento casi lineal del consumo de energía en el mundo subdesarrollado a lo largo de dos decenios. Como vamos a exponer, tal crecimiento es imposible de sostener, por lo que resulta esencial enfocar el problema energético desde un nuevo ángulo.

En el mundo moderno, constreñido por el capital y sometido a él, resulta cada vez más difícil que los países subdesarrollados se procuren los capitales necesarios para incrementar su producción de energía. En 1989, el Banco Mundial cuantificó el problema durante la Conferencia Mundial

AMULYA K.N. REDDY y JOSE GOLDEMBERG han publicado con frecuencia sobre los temas de energía, tecnología y desarrollo, y colaborado en diversos proyectos. Reddy es presidente del Departamento de Estudios de Gerencia y Dirección en el Instituto Indio de Ciencias, en Bangalore, y vicepresidente del Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología de Karnataka. Es coautor de un texto de electroquímica. Goldemberg, ministro de Ciencia y Tecnología de Brasil, ha sido profesor de física en la Universidad de Sao Paulo desde 1951, de la que fue rector entre 1986 y 1989. Ha sido también presidente de la Compañía de Energía del estado de Sao Paulo.

sobre Energía, celebrada en Montreal, revelando que las necesidades de capital de los países en vías de desarrollo, sólo para el sector eléctrico, suman alrededor de un billón de dólares durante el decenio próximo. A pesar de lo cual, el Banco Mundial y otras entidades de financiación bilateral o multilateral no pueden facilitarles más que unos 20.000 millones de dólares anuales. En los propios países subdesarrollados, el capital demandado por el sector eléctrico es cuatro o cinco veces mayor que el disponible.

Dejando aparte las consecuencias económicas, la tendencia actual al alza del consumo energético tiene serias repercusiones en el medio ambiente. En el ámbito local, entre las principales consecuencias del crecimiento del consumo energético se cuentan la desaparición de bosques anegados por las aguas de las presas hidroeléctricas, la contaminación atmosférica y las lluvias ácidas provocadas por las centrales térmicas de carbón, amén de la deforestación causada por la fuerte demanda urbana (y a veces, también rural) de leña para cocinar.

Este mayor consumo energético afecta, asimismo, a la atmósfera de nuestro planeta. Es verosímil que el consumo de combustibles fósiles en los países en desarrollo (responsable hoy del 19 por ciento del total de las emisiones provocadas por dichos combustibles) se duplique en el plazo de 20 años. La deforestación contribuye a acentuar la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera, ya que las plantas absorben dicho gas durante la fotosíntesis.

Lo más frecuente, empero, es que la deforestación se deba a la tala de bosques para agricultura o ganadería, para obtener leña o carbón vegetal, o materia prima para las industrias del papel y del rayón. Entre las causas de deforestación de origen energético se cuenta la desaparición de bosques en los embalses y la recolección de combustibles de la madera (troncos y carbón vegetal) para las industrias y viviendas urbanas. Las viviendas rurales contribuyen también marginalmente a la deforestación cuando la tasa de recogida de madera excede el ritmo de regeneración del bosque.

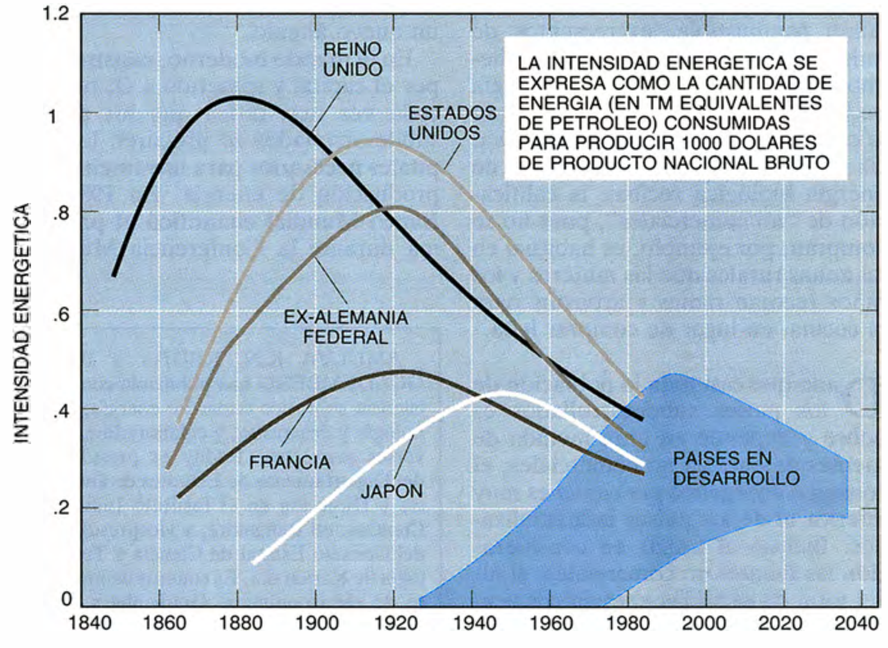
Para mejor valorar la deforestación provocada por el consumo de leña, tomemos el caso de Africa. El total de combustible vegetal que en ella se consume (contando también el carbón vegetal) es de unos 300 millones de toneladas. Para obtener este combustible talando árboles hay que deforestar al menos 2 millones de hectáreas anuales, lo que trae consigo la erosión del suelo, la extinción de especies y perturbaciones en la climatología local. La combustión de madera contribuye aproximadamente con el 4 por ciento a la totalidad de las emisiones mundiales de dióxido de carbono.

En la actualidad, la deforestación en los países subdesarrollados es responsable de alrededor del 23 por ciento del total de las emanaciones de dióxido de carbono, y no da señales de que vaya a disminuir. Si se consideran conjuntamente las emisiones debidas a los combustibles fósiles y a la deforestación, resulta claro que, aunque los países industrializados estabilizasen sus emisiones de los gases responsables del efecto de invernadero, las naciones en vías de desarrollo seguirían ellas solas degradando la atmósfera mundial.

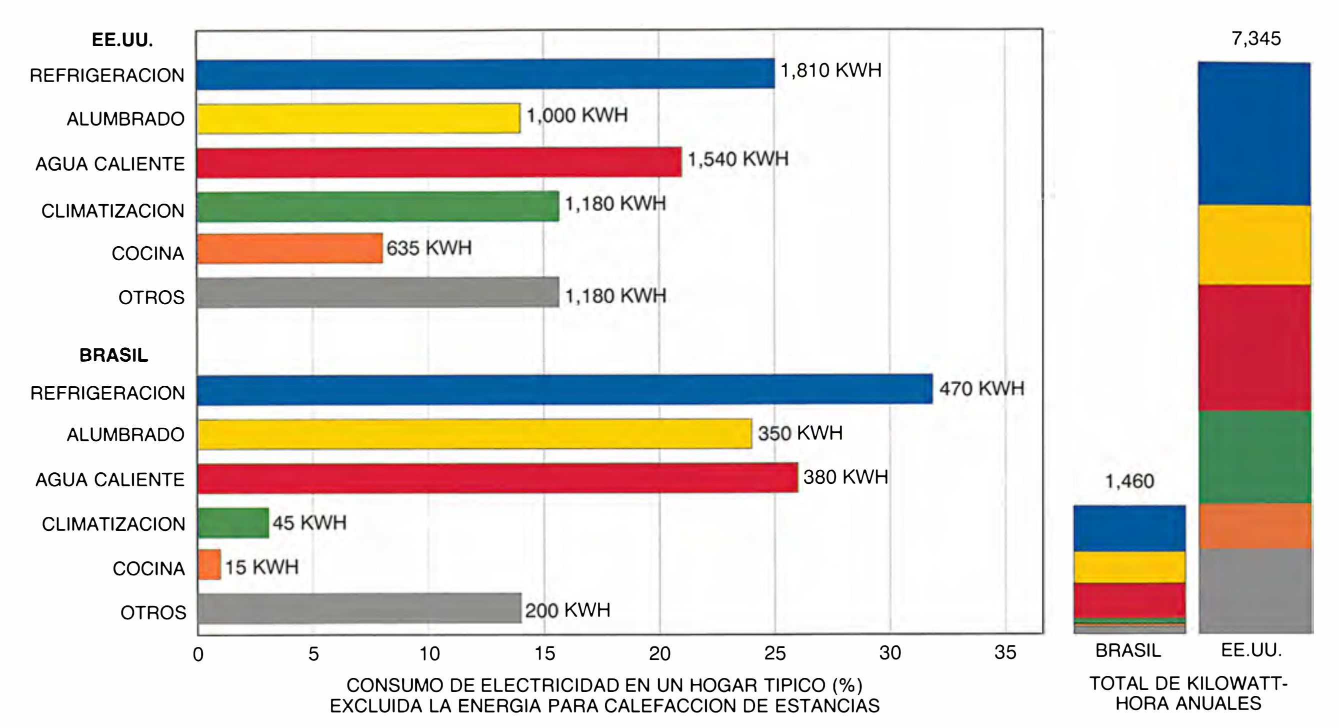
Las tendencias energéticas en curso provocan conflictos en el seno de los países en desarrollo. Los organismos de ayuda, los gobiernos, los industriales y demás promotores del desarrollo incitan a un drástico aumento del consumo energético, a pesar de que tales incrementos requieren un volumen de capital imposible de obtener y son perniciosos para el medio ambiente. Los grupos ecologistas locales arguyen entonces que el proceso de desarrollo es insostenible y que es imprescindible detenerlo. Mientras tanto, la población desplazada de sus hogares y sus tierras a causa de las presas hidroeléctricas y demás planes energéticos se tiene a sí misma, no por beneficiaria del desarrollo, sino por víctima.

El conflicto entre la necesidad de desarrollo y la necesidad de cuidar y conservar nuestro planeta es tema dominante en los debates internacionales sobre energía. Para controlar la degradación de la atmósfera, los países industrializados suelen tratar de imponer limitaciones al consumo de energía en los países en vías de desarrollo. Los países subdesarrollados responden haciendo hincapié en la necesidad de elevar sus reducidos niveles de consumo energético *per capita*. En tanto ambas facciones sigan atrapadas en el paradigma convencional, que toma el consumo de energía como indicador adecuado del nivel de desarrollo, el conflicto no podrá resolverse sin sacrificio.

Resulta esencial, por consiguiente, un nuevo paradigma para el uso de la energía. Es preciso dejar de considerar a la energía como un fin en sí misma, como un bien intrínseco, y entenderla como un medio para proporcionar servicios. Pues son los servicios –y no la energía– quienes satisfacen directamente las necesidades de la gente. La calidad de vida en una población depende más –pongamos por caso– de la cantidad de iluminación



2. EN LOS PAISES INDUSTRIALIZADOS, la intensidad energética, que es la razón del consumo de energía al PNB (producto nacional bruto), empezó subiendo, para decaer luego. Merced al avance de la ciencia de los materiales y las mejoras de rendimiento, los máximos alcanzados en el proceso de industrialización de los distintos países han ido disminuyendo progresivamente a lo largo del tiempo. Las naciones en vías de desarrollo podrían evitar que se repitiera en ellos la historia contraproducente seguida por los países ya industrializados, sacándole mayor partido a la energía que consumen.



3. EN LOS PAISES EN VIAS DE DESARROLLO, la gente pudiente tiende a emular el estilo de vida y los hábitos de consumo energético del mundo industrializado. Las pautas de consumo de electricidad en los hogares brasileños que disponen de ella son similares, en líneas generales, a las de los hogares estadounidenses, aunque en términos absolutos las diferencias contrastan fuertemente. (Diagramas realizados por Michael Goodman.)

(medida en lúmenes) que de los kilowatt-hora o los litros de keroseno consumidos en alumbrado. El grado de accesibilidad a los servicios energéticos constituye, por tanto, el verdadero indicador del nivel de desarrollo.

El desarrollo exige, consiguientemente, mayores incrementos en el nivel *per capita* de los servicios energéticos. Servicios que, a su vez, se obtienen gracias a utensilios terminales, como estufas, motores y equipos de alumbrado, que convierten la energía y la ponen a nuestro servicio. La utilización de dispositivos eficientes permite ahorrar energía y proporciona los mismos servicios con menores consumos energéticos, o servicios superiores para consumos iguales.

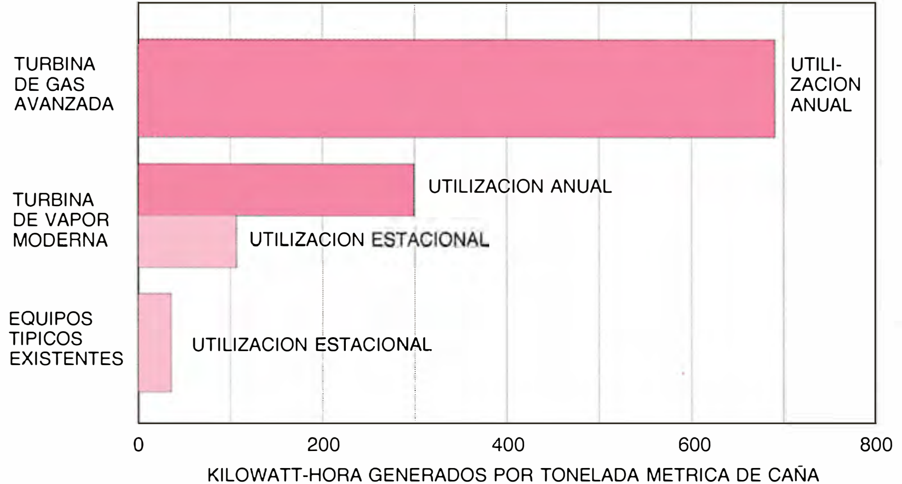
En los países en vías de desarrollo, el ahorro de energía no debe conseguirse por reducción de los servicios. Es preciso fundamentarlo en la ampliación de los servicios energéticos, al tiempo que se estabiliza o limita el consumo de energía –por ejemplo, produciendo más luz con igual o menor número de kilowatt-hora de electricidad. La sola estabilización del consumo podría bastar para las necesidades de los países subdesarrollados en el momento presente, pero el desarrollo de estos países exige industrialización, proceso que depende a su vez del incremento en la producción de bienes y del funcionamiento de los servicios comerciales, magnitudes medidas por el producto nacional bruto (PNB). Típicamente, los países en desarrollo se han fijado como meta tasas de crecimiento del PNB situadas entre el 5 y el 10 por ciento al año, aunque pocos han conseguido alcanzarlas.

Cuando Europa occidental y Norteamérica acometieron su industrialización, su consumo energético hubo de crecer más velozmente que su PNB para poder construir infraestructuras: carreteras, puentes, viviendas e industria pesada. Pero a causa de la revolución que la ciencia de los materiales ha experimentado a lo largo del último medio siglo, resulta factible ahora producir los materiales con menor consumo de energía, al tiempo que cantidades menores de materiales modernos permiten reemplazar cantidades mayores de los tradicionales. Consiguientemente, los países en desarrollo pueden alcanzar niveles de industrialización equiparables, con una relación más baja entre consumo energético y crecimiento del PNB.

A pesar de las prometedoras técnicas de ahorro y de los avances de la ciencia de materiales, seguramente resultará vital para el desarrollo incrementar de forma notable el consumo de energía. Los países en desarrollo precisan de una combinación bien equilibrada de mejoras en el rendimiento de los equipos terminales y de tecnologías centralizadas y descentralizadas. (Las tecnologías centralizadas –una planta nuclear, sea por caso– generan electricidad en un cierto emplazamiento, que luego se distribuye por una zona extensa. Las tecnologías descentralizadas, como las pequeñas presas hidroeléctricas, producen cantidades de energía mucho menores, que se consumen en la vecindad.)

Un procedimiento cuantitativo para identificar los ingredientes de tal combinación consiste en trazar para las distintas tecnologías disponibles una curva de suministro de costo mínimo. Tal curva hace posible la ponderación de costos y la determinación de las potenciales aportaciones energéticas correspondientes a cada tecnología, amén de establecer la combinación de tecnologías menos onerosa que permita alcanzar un determinado objetivo de producción energética.

Resulta invariablemente más económico ahorrar un kilowatt que producir un kilowatt. Asimismo, la generación de energía tan cerca del punto de consumo como sea posible minimiza los costos de transmisión y distribución. Por consiguiente, son muchas las técnicas descentralizadas y ahorradoras que pueden caber en una combinación de costo mínimo. Dado que toda mejora en el aprovechamiento de la energía resulta favorable para el medio ambiente, las combinaciones técnicas consiguientes pue-



4. DESTILERIAS BRASILEÑAS de etanol (*arriba*), las más eficientes del mundo; convierten en alcohol la melaza de la caña de azúcar, que sirve de combustible a los automóviles del país. Mejores equipos de producción de electricidad a partir de vapor generado por combustión de las bagazas (residuos de la caña) podrían convertir a las factorías azucareras en exportadoras de energía (*abajo*).

den promover el desarrollo sin comprometer su continuidad.

Porque las mejoras de rendimiento posibilitan el crecimiento del PNB manteniendo constante el consumo energético, las combinaciones tecnológicas que contemplan programas de eficiencia energética reducen el acoplamiento entre energía y PNB. El resultado es un recorte de la inversión anual en energía, más al alcance de los presupuestos.

La hipótesis de que el acoplamiento entre energía y PNB resulta así debilitado se ha visto confirmada por estudios de la evolución a largo plazo de la razón energía/PNB de muchos países. Los estudios pusieron de manifiesto que tal razón decrecía con regularidad, excepto cuando los países procedían a establecer la infraestructura de su industria pesada. Varios eran los factores responsables de tal declive: saturación de la demanda de bienes de consumo en los países industrializados, desplazamiento de la actividad económica desde las industrias pesadas y de procesamiento de materiales hacia los servicios, amén de la revolución de la ciencia de los materiales.

El nuevo paradigma realza la importancia de que los planteamientos propuestos estén enfocados hacia el objetivo final del desarrollo, aprovechando al mismo tiempo cuantas ocasiones se presenten para mejorar el uso terminal de la energía. Con otras palabras, los planificadores deberían elaborar propuestas y proyectos del tipo que hemos dado en llamar DEFENDUS (acróstico de DEvelopment-Focused, END USe-oriented, service-directed); planteamientos orientados hacia el desarrollo, pensados desde la perspectiva de la utilización terminal y concebidos para proporcionar mejores servicios; proyectos que den cabida a la conservación del medio y se sirvan de energías renovables, y combinando con un costo mínimo todos estos elementos.

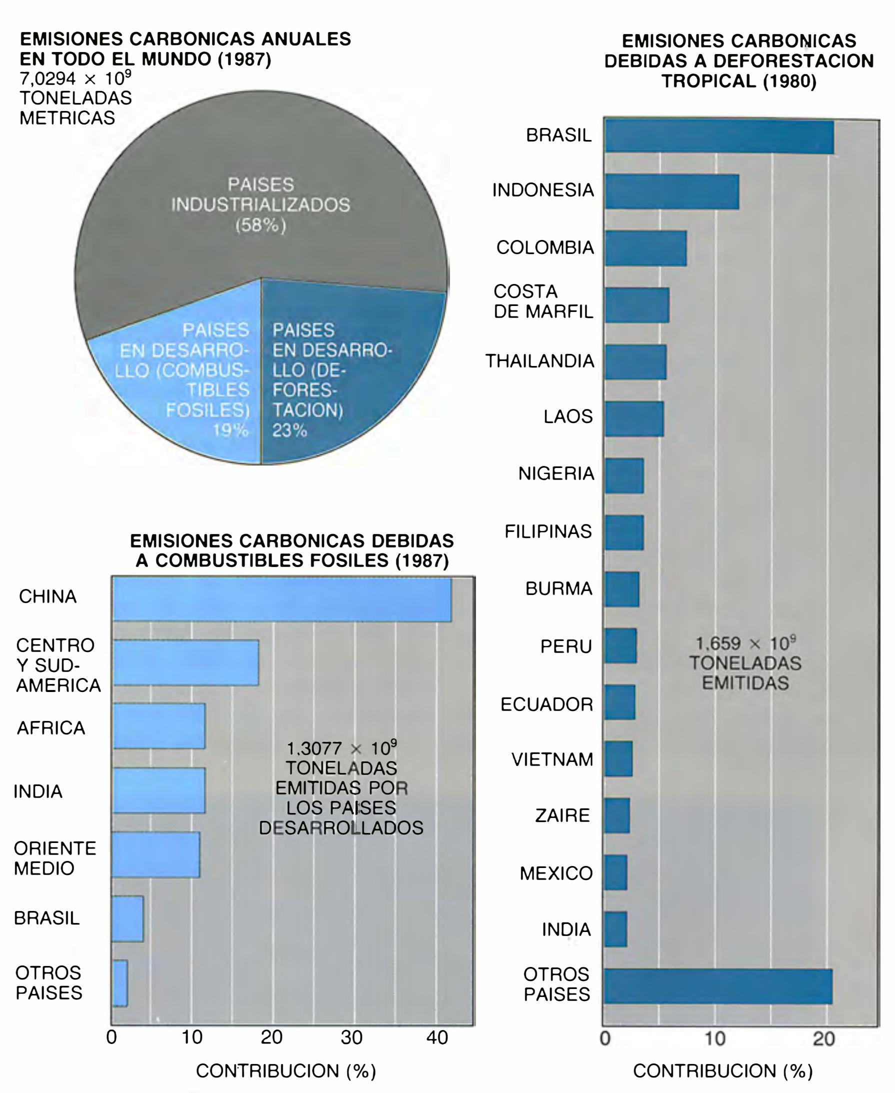
Uno de los autores (Reddy) ha contribuido a elaborar un proyecto DEFENDUS para el sector eléctrico del estado de Karnataka, en la India meridional. Tal proyecto constituía una contrapropuesta a ciertos planes de electrificación de la zona, en especial a las soluciones ofrecidas en el informe de la comisión "Long Range Plan for Power Projects [LRPPP]" en Karnataka, dado a conocer en mayo de 1987, que constituían claros ejemplos del fracaso de los análisis tradicionales de la planificación, sesgados por teorías ofertistas y obsesionados por el consumo.

Para alcanzar un objetivo que se cifraba en la producción de una energía de 47.520 gigawatt-hora con una potencia máxima de casi 9,4 gigawatt para el año 2000, el proyecto LRPPP exigía que el estado de Karnataka invirtiese la astronómica suma de 17.4000 millones de dólares, suma equivalente, más o menos, a unas 25 veces el presupuesto anual del estado. Tendría éste que construir una extensa infraestructura eléctrica, erigir inmensas instalaciones de producción centralizada (entre ellas, una térmica de carbón de 1 gigawatt, más unos 2 gigawatt de energía nuclear), solicitar fondos del Banco Mundial y del gobierno central, dedicar a energía no menos de 25 por ciento de su presupuesto y recurrir a la industria privada para aumentar la capacidad generadora. A pesar de tales medidas, el LRPPP pronosticaba que seguiría la penuria energética incluso entrado el siglo próximo. Un plan convencional como éste no constituía una solución, sino un ejercicio de despilfarro.

La propuesta DEFENDUS para Karnataka resulta prometedora cuan desalentadora la LRPPP. Reclama la instalación de luces eléctricas en todos los hogares de Karnataka, el empleo de bombas de riego eléctricas hasta el límite que consienten los acuíferos, el establecimiento en los pueblos de plantas energéticas descentralizadas y la promoción de industrias para aumentar el empleo. A pesar de lo cual, la propuesta DEFENDUS estima que las necesidades de energía y de potencia en el año 2000 serán solamente un 38 y un 42 por ciento, respectivamente, de las previstas en el LRPPP.

El 59 por ciento de la reducción en la energía requerida se logra gracias a un planteamiento desarrollista mejor encaminado; una sociedad que mejora prudentemente la suerte de los pobres necesita menos energía que otra que no causa tanta mella en la pobreza. El 41 por ciento restante emana de simples mejoras en el rendimiento y en la sustitución de unos portadores de energía por otros. Entre estas medidas podemos citar la sustitución de motores de bajo rendimiento y de las bombillas de incandescencia por motores más eficientes y lámparas fluorescentes compactas, la sustitución de los calentadores eléctricos de agua por placas solares y de las cocinas eléctricas por cocinas de butano o propano, así como dotar a los sistemas de regadío de válvulas sin fricción y conducciones de mejor calidad.

Junto a estas mejoras de rendimiento, las propuestas DEFENDUS contemplan la puesta en servicio de una combinación de técnicas tendentes a reemplazar la electricidad (caso de los calentadores solares), la instalación de plantas descentralizadas (pequeñas hidroeléctricas y centros energéticos rurales, alimentados por biomasa) en conjunción con centrales mayores de tipo tradicional. Dado que la demanda de energía ha sufrido una drástica reducción, resulta posible, por lo general, evitar el recurso a las tecnologías centralizadas más controvertidas por su impacto ecológico, como ocurre con las centrales nucleares, las térmicas de carbón y los grandes embalses hidroeléctricos.



5. COMBUSTION de combustibles fósiles y deforestación: dos factores que contribuyen en los países en vías de desarrollo a elevar las cifras de carbono atmosférico, en forma de dióxido de carbono, monóxido de carbono y hollín. Los planes de desarrollo que incrementen las cuotas de emisiones de carbon de estas naciones degradan la atmósfera y tal vez supongan riesgos de cambios climáticos.

El costo estimado de las propuestas DEFENDUS sería sólo de un tercio del proyecto LRPPP, lo que significa que el precio por unidad de energía sería mucho menor. Incluso suponiendo que se tardasen 10 años en introducir las mejoras de rendimiento, el plan DEFENDUS permitiría disponer de más energía antes que el LRPPP. Y el sistema DEFENDUS sólo liberaría cada año alrededor de un 0,5 por ciento más de dióxido de carbono que aquél. Karnataka ha rechazado el plan LRPPP; sólo ahora está empezando el DEFENDUS a merecer cierta consideración.

Las propuestas de DEFENDUS para Karnataka no pretenden ser receta universal que proporcione un plan energético rápido, barato y ecológicamente benigno. Dado que las pautas de consumo energético de otras regiones difieren sustancialmente de las de Karnataka, al igual que sus recursos, es forzoso que los potenciales de ahorro y las combinaciones tecnológicas de costo mínimo hayan de variar. No obstante, el enfoque cuantitativo subyacente a DEFENDUS es aplicable en otros países subdesarrollados, y en ello estriba su fuerza.

Por muy prometedores que sean para Karnataka los planteamientos de DEFENDUS, sus propuestas tecnológicas son francamente tímidas y nada revolucionarias, pues se basan en su totalidad en técnicas muy experimentadas. Además, el plan no toma en consideración las ventajas adicionales que comporta la aplicación de las técnicas más ahorradoras de energía para dotar a un país de la infraestructura idónea.

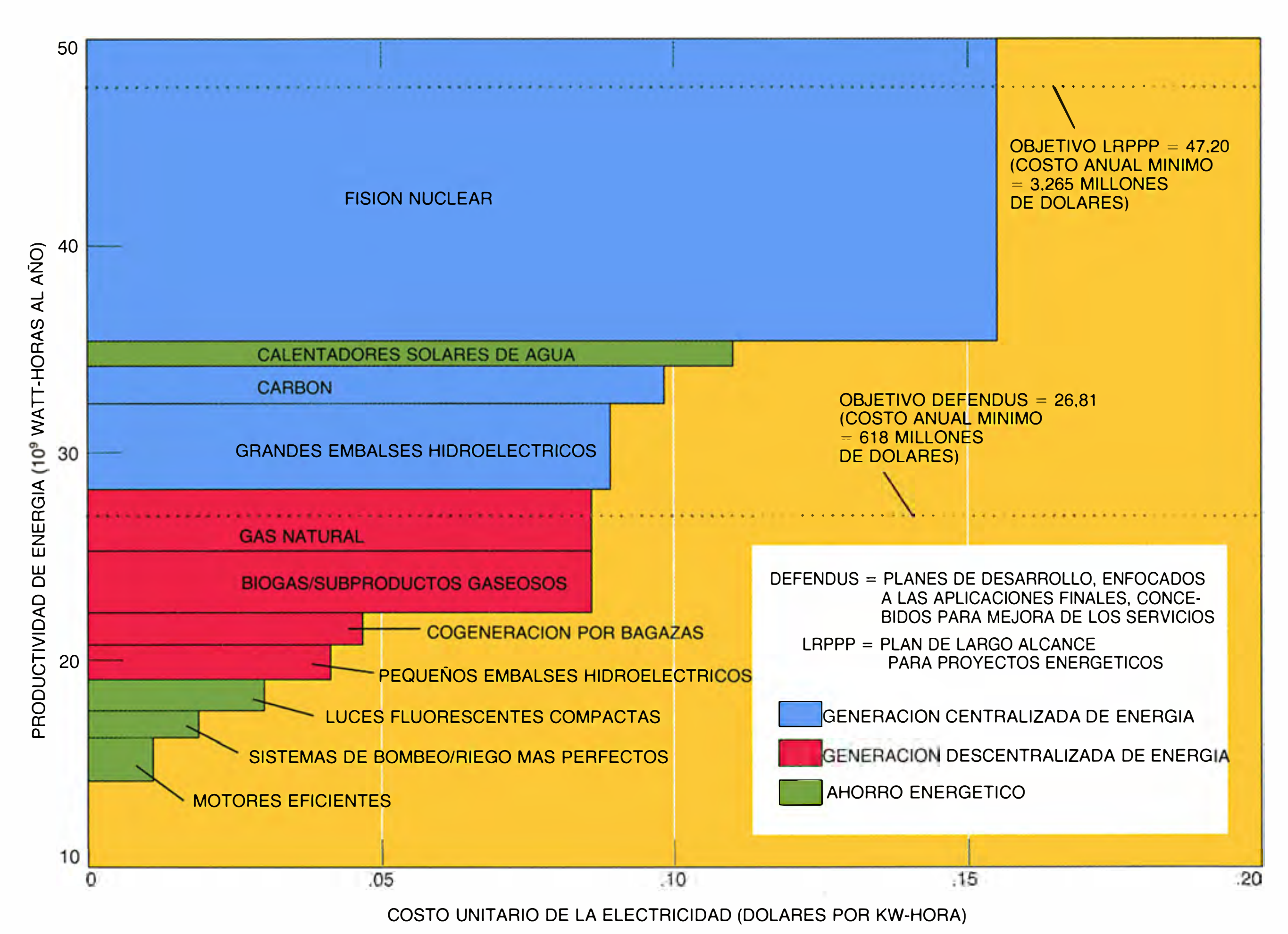
Las grandes sumas ya invertidas por los países industrializados en sus infraestructuras desalientan nuevas inversiones para mejorar el aprovechamiento. Sin embargo, en la mayoría de los países en vías de desarrollo son muchas las industrias vitales, los edificios, carreteras y sistemas de transporte que aún están por erigir. Así pues, las naciones en vías de desarrollo tienen la oportunidad de adoptar las tecnologías energéticamente más eficaces, antes incluso de que se hayan generalizado en los países industrializados. Tales "saltos tecnológicos" habrán de convertirse en ingrediente esencial de las estrategias energéticas DEFENDUS.

El programa brasileño de producción de alcohol, que supuso una iniciativa innovadora frente a la crisis petrolífera de los años setenta, nos proporciona un excelente ejemplo de uno de estos saltos tecnológicos. Brasil, que se enfrentaba a un déficit cada vez más fuerte en su balanza de pagos provocado por las enormes subidas de precio del petróleo, decidió sustituir la gasolina para automoción por etanol puro y gasohol (una mezcla de gasolina y etanol). Consideraciones económicas aparte, el etanol ofrece un índice de octano más elevado que la gasolina, además de otras ventajas.

La producción de etanol por fermentación de la caña de azúcar pasó de 900 millones de litros en 1973 a 4080 millones en 1981, de los cuales, 1880 millones se convertían en etanol hidratado (de 91 a 93 por ciento de etanol, más agua); los 2200 millones de litros restantes fueron convertidos en etanol anhidro y mezclados con un 20 por ciento de gasolina. En 1989, 12.000 millones de litros de etanol sustituyeron unos 200.000 barriles de gasolina diarios (alrededor de 24 millones de litros) en unos 5 millones de automóviles brasileños. La industria del alcohol creó 700.000 puestos de trabajo. El excelente rendimiento de los automóviles propulsados por etanol mejoró sensiblemente la calidad del aire en metrópolis contaminadas como São Paulo y Río de Janeiro.

Pero lo más importante es que Brasil, un país en vías de desarrollo, estableció todo un ciclo de combustible –desde una fuente de energía (la caña de azúcar) hasta los dispositivos terminales (los automóviles propulsados por etanol)– inexistente en los países industrializados. Lo mismo que un niño que juega a pídola salta por encima de sus compañeros, así Brasil "saltó" tecnológicamente sobre los países industrializados.

El precio medio del etanol produ-



6. DOS PLANES ENERGETICOS propuestos para el estado de Karnataka, en la India, se diferencian grandemente en sus previsiones de energía e inversión de capital. Aunque un plan DEFENDUS propone una producción energética muy inferior a la de LRPPP, aspira a proporcionar mayores servicios. Se han representado gráficamente los costes y aportaciones energéticas de diversas tecnologías de generación y ahorro energético, con el fin de calcular el método más barato de alcanzar las metas DEFENDUS y LRPPP correspondientes al año 2000. (En las cifras relativas a tecnologías centralizadas se han contado los costes de instalación de la red de transmisión y distribución.) Las metas del plan DEFENDUS podrían conseguirse sin recurrir a técnicas cuya aceptación resulta aún bastante controvertida; por ejemplo: centrales nucleares y grandes embalses hidroeléctricos.

cido en la región meridional de Brasil ronda en la actualidad las 18 pesetas/litro. A este precio, el etanol podría competir con éxito frente al petróleo importado si el precio internacional del crudo fuese de unos 24 dólares el barril (estamos hablando antes de la crisis del golfo Pérsico de agosto de 1990). Sin embargo, al caer los precios del crudo a mediados de los ochenta, el programa brasileño de etanol hubo de afrontar una seria crisis económica y tuvo que ser subvencionado por el gobierno.

La situación económica general del país provocó presiones internas para reducir más todavía el precio del etanol y al mismo tiempo eliminar los subsidios. Tal presión obligó a grandes esfuerzos para mejorar la productividad y la economía de las plantaciones de caña y de la producción de etanol. El resultado ha sido una reducción anual del 4 por ciento en los precios del etanol. Las destilerías de etanol se han convertido en las mejores del mundo y compiten vigorosamente en el mercado internacional.

El coste efectivo del etanol podría reducirse más todavía si los residuos de la caña, después de ser machacada y exprimida, se quemaran debidamente para producir vapor que generase electricidad. En nuestros días, las turbinas de vapor a baja presión generan unos 20 kilowatt-hora de electricidad por tonelada de caña de azúcar. Las turbinas de alta presión podrían triplicar esa cifra y, decuplicarla, las turbinas de gas. Dichas instalaciones de cogeneración de energía podrían añadir atractivos a los complejos de destilación de alcohol de caña, convirtiéndolos en empresas exportadoras de energía.

En breve, si los proyectos DEFENDUS no se limitasen a utilizar los recursos tecnológicos ya existentes, y sacasen también partido de los saltos tecnológicos, sería verosímil que resultasen más atractivos todavía.

El análisis DEFENDUS pone de relieve cuatro prioridades nacionales, que constituyen la esencia de un desarrollo mantenido y sostenible. En primer lugar, los países en vías de desarrollo deberían conceder total prioridad a la satisfacción de las necesidades energéticas básicas de sus poblaciones. Segundo, han de superar las graves limitaciones de capital que hoy frustran el futuro de las energías convencionales. Tercero, hay que sacarle más partido a los recursos energéticos. Y cuarto, la producción y el uso de energía han de gestionarse buscando siempre y a corto plazo el mínimo impacto en el entorno local.

¿Habrían de graduarse estas prioridades en el orden expuesto? La respuesta sería negativa si nos dejásemos influir por el ejemplo de los países industrializados, donde la preocupación por el ambiente ha cobrado intensidad antes incluso de haber resuelto sus bolsas de pobreza. Por otra parte, habría de ser afirmativa, aun señalando que son los pobres quienes más directamente se beneficiarían de las mejoras ambientales: la salud de los pobres es peor que la de los ricos, y no pueden escapar de los entornos degradados con la misma facilidad. Pero el problema de la supervivencia es, para los pobres, de tal urgencia y crudeza que en caso necesario sacrificarán el ambiente para sobrevivir. Como la primera ministra Indira Gandhi proclamó en Estocolmo en una conferencia sobre medio ambiente: "¡No hay agente más contaminante que la miseria!"

Como salta a la vista, mejora del entorno y reducción de la pobreza –por no decir su erradicación– son de gran importancia y merecen atención simultánea siempre que sea posible. Dicha actuación es fruto natural de la concepción del desarrollo como proceso ecológicamente coherente y fundado en sí mismo, encaminado a la atención de ciertas necesidades.

Si nos parece erróneo anteponer las prioridades nacionales a la obligación internacional de preservar la atmósfera, ello se debe a que los planes de desarrollo tradicionales, basados en el consumo de energía, obligan a una solución de equilibrio entre ambas prioridades. La peor de las soluciones sería exigir a los países en vías de desarrollo la protección del ecosistema global a expensas de urgentes tareas de desarrollo nacional. La única respuesta que probablemente tendrían tales recomendaciones sería que a los países industrializados corresponde el asumir la responsabilidad de evitar una catástrofe climatológica, pues son los principales culpables de las emisiones gaseosas que provocan el efecto de invernadero, amén de ir en su propio interés.

Por fortuna, no es inevitable que se produzca una colisión frontal de este tipo entre los países subdesarrollados y los industrializados. Las únicas estrategias tendentes a evitar cambios climatológicos desastrosos que pudieran resultar aceptables para los países atrasados son aquellas que atiendan simultáneamente a las prioridades del desarrollo. En el futuro, si el uso de la energía es eficiente, los planes de desarrollo pueden satisfacer las necesidades de la población al tiempo que subsidiariamente contribuyen a aliviar los males ambientales que padece el planeta.

Tenemos a nuestro alcance un futuro energético compatible con la conservación del mundo y con un desarrollo viable. Las opciones que proponemos requieren un liderazgo político imaginativo, pero las decisiones que comportan son mucho menos arriesgadas y difíciles que las exigidas por los enfoques convencionales.

La introducción eficaz de cambios en el sistema energético comporta actuaciones en todos los niveles, empezando por los individuos. Los consumidores que no sacan el máximo partido a su energía pueden clasificarse en tres categorías: los ignorantes, los pobres y los indiferentes. La primera está compuesta por personas que desconocen, por ejemplo, que el rendimiento de los gases licuados al cocinar es sensiblemente mayor que la del keroseno. Estas personas pueden recibir la instrucción necesaria en ese ámbito.

En la segunda categoría se encuadran quienes carecen del capital para adquirir aparatos más eficientes, cuyo coste inicial es de ordinario más alto. Una criada hindú puede saber que en la casa donde trabaja se gasta menos cocinando con butano que ella, que cocina con petróleo, pero a lo mejor no puede pasarse al butano porque las cocinas de butano cuestan unas 20 veces más que los hornillos de keroseno.

Para ayudar a los consumidores a quienes el desembolso inicial les resulta prohibitivo, los servicios públicos y otras instituciones deberían ayudar a financiar la adquisición de equipos eficientes mediante préstamos recuperables a través de los recibos mensuales de energía. Otra posibilidad sería que los servicios públicos alquilasen equipos que ahorren energía. Las economías del consumidor en gastos de energía pueden superar los gastos de devolución del crédito más el importe de la nueva energía consumida. En teoría, este método de conversión de los costos iniciales en gastos de funcionamiento podría ampliarse también a clientes comerciales y empresas, lográndose al mismo tiempo la mejora del rendimiento energético y la modernización de los equipos.

A la tercera categoría de consumidores pertenecen quienes no sienten incentivo alguno en maximizar la energía gastada sea por lo barato que les sale, sea porque el ahorro puede parecerle insignificante. Por ejemplo, hay en los EE.UU. toda una gama de automóviles de distinta eficiencia es-

pecífica, pero cuyo costo total operativo es el mismo, creando así una "meseta de indiferencia" para los usuarios.

Es función de las instancias superiores comprometer a estos consumidores en el mejor aprovechamiento del consumo. Es posible que los gobiernos hayan de imponer por vía legislativa normas que exijan un mayor rendimiento en los dispositivos terminales, como hizo el gobierno estadounidense al establecer rendimientos mínimos en el consumo de combustible de su parque automovilístico.

Para mejorar los sistemas energéticos en los países subdesarrollados será preciso que cambien las actitudes tradicionales de los servicios públicos, de las instituciones financieras y de los gobiernos. En particular, habrán de establecerse nuevos métodos para convertir el costo inicial de los sistemas eficientes en gastos de funcionamiento.

La construcción de los sistemas energéticos hoy existentes en el mundo ha exigido inversiones enormes. Se financiaron mediante préstamos avalados por el estado, deuda pública e inversiones gubernamentales directas; todo lo cual permitió la devolución de las inversiones en un plazo largo y a tipos de interés muy inferiores a los habituales en el mundo de los negocios. En los países en vías de desarrollo, en los casos que escasea el capital, la mayoría de las inversiones son efectuadas por el gobierno y están respaldadas, en general, por préstamos del Banco Mundial y de instituciones bancarias internacionales.

En casi todos los países, la normativa estatal estipula que muchos servicios públicos reciban retornos netos situados en torno al 10 por ciento cuando tales capitales sean invertidos en la generación de más energía. Así pues, las inversiones en producción energética no corren apenas ningún riesgo. Por el contrario, las inversiones encaminadas a mejorar el consumo y otras medidas de ahorro de energía reciben el mismo trato que cualquier otra empresa y han de ser reembolsadas a bancos comerciales en plazos bastante cortos y a tipos de interés elevados.

Con todo, las mejoras de rendimiento suponen invariablemente menos capital que los incrementos equivalentes en oferta energética. El verdadero problema no estriba tanto en las sumas necesarias para conseguir sacarle mayor partido al consumo de energía, sino en los obstáculos organizativos e institucionales que obstruyen el camino.

Supongamos, por ejemplo, que se haya de tomar la decisión de invertir 200.000 millones de pesetas en una planta de producción centralizada de energía o en mejorar la eficiencia de los equipos terminales. La construcción de una gran central constituye una tarea razonablemente sencilla, realizable por un equipo pequeño y disciplinado. Invertir 200.000 millones en mejorar equipos terminales es mucho más complicado. Si cada medida concreta costase entre 200.000 pesetas y 2000 millones, sería preciso estudiar un mínimo de cien subproyectos y un máximo de un millón. Es difícil organizar tantas y tan diversas actividades.

La comercialización de las mejoras terminales es intrínsecamente más difícil que la venta de los equipos y suministros energéticos tradicionales, pues no basta ocuparse sólo del producto, del nuevo aparato más eficiente energéticamente; es preciso atender igualmente a los "intangibles", a los conceptos y rutinas que ayudarán a los usuarios a comprender y servirse de las ventajas de los nuevos aparatos. Si nuestra meta consiste en buscar un consumo energético terminal eficiente en los países subdesarrollados, es preciso atender a todos los aspectos de la promoción comercial del ahorro energético.

Los servicios de gas y electricidad se encuentran especialmente cualificados para la promoción de la idea de eficiencia terminal y la distribución y venta de los correspondientes equipos. En los Estados Unidos, algunos de los servicios públicos más avanzados han comenzado a patrocinar programas de ahorro dirigidos a los consumidores. Los servicios públicos se hallan, asimismo, en buena situación para encaminar sus considerables recursos financieros a inversiones economizadoras de energía. Poseen la estructura administrativa adecuada para canalizar capital hacia los muchos consumidores domésticos e industriales con que tratan. Además, su sistema de facturación regular constituye un vehículo ideal para que los consumidores devuelvan los préstamos concedidos por el servicio.

Se puede llevar a cabo una amplia campaña de ahorro energético por diversas vías. Una posibilidad consistiría en que las empresas y servicios públicos correspondientes, en lugar de limitarse al suministro de energía, se convirtiesen también en proveedoras de servicios asociados, como calefacción, refrigeración, alumbrado y similares. Las entidades financieras podrían también ayudar a las empresas energéticas a transformarse en proveedoras de servicios.

Para que en los países subdesarrollados pueda tener lugar cualquiera de estas mejoras, es preciso que los gobiernos locales, estatales y federales aprendan a formular políticas energéticas de nuevo cuño. Lo primero y principal es que se tome el nivel de servicios energéticos y no la magnitud del consumo como auténtico indicador energético de desarrollo. Ha de concederse prioridad absoluta a la ampliación de los servicios que eleven la calidad de vida de los pobres, que generen empleo e influyan en sectores económicos de importancia crucial, como la agricultura y la industria.

Como se ha visto, los encargados de planificación pueden aumentar la disponibilidad de los servicios energéticos ya sea produciendo más energía, ya mejorando el rendimiento de los equipos que proporcionan los servicios. Es preciso comparar con equidad el costo y el impacto medioambiental de unas y otras soluciones para determinar los procedimientos óptimos. La energía ahorrada merced al superior rendimiento de los equipos ha de ser tenida por energía adicional producida. Debemos mejorar el rendimiento de las plantas descentralizadas con plantas centralizadas de acuerdo con unos mismos plazos de amortización, tipos de interés, beneficios, incentivos, subsidios y demás consideraciones.

En la actualidad, la balanza se inclina injustamente en favor de las grandes centrales y en contra de las medidas tendentes a un mayor aprovechamiento energético. Sería preciso arbitrar medidas políticas claras



7. LOS SERVICIOS PUBLICOS pueden inducir a los consumidores a utilizar aparatos más eficientes —hornillos de butano, por ejemplo— bien alquilando los equipos o bien ofreciendo para su adquisición préstamos a bajo interés.

que permitieran una limpia confrontación, eliminando los subsidios a la producción energética, consiguiendo que los precios reflejen los costes marginales a largo plazo y confeccionando bases de datos fiables que permitan establecer comparaciones.

Entre los instrumentos políticos utilizables para concretar estas actuaciones de política energética se cuentan las fuerzas del mercado, los subsidios, los impuestos, una normativa oficial y el etiquetado específico de los aparatos. Cada instrumento posee su grado de eficacia y de ineficacia. La introducción de cualquier medida de eficiencia energética habrá de emanar de una actuación específica de los instrumentos políticos.

El mercado es excelente como repartidor de capital, materias primas y recursos humanos; es preciso sacar el máximo partido de sus puntos fuertes. Pero las fuerzas del mercado tienen también sus limitaciones. En particular, no se puede esperar de ellas que salvaguarden la justicia social, se paren en consideraciones a largo plazo o respeten el entorno. Es preciso idear medidas especiales para la protección de los pobres, del ambiente y de otros aspectos.



8. LOS EMBALSES HIDROELECTRICOS pueden anegar bosques y desplazar pueblos de sus asentamientos. Al planificar, es preciso tomar por adelantado buena cuenta de todos estos problemas.

Si los organismos internacionales de ayuda al Tercer Mundo cambiasen de táctica, podrían contribuir a la puesta en práctica de estrategias DEFENDUS en los países subdesarrollados. Al distribuir las ayudas, los organismos deben comparar los aumentos de oferta energética y las mejoras de rendimiento sobre unas mismas bases, dentro de un único proceso de decisión, en lugar de examinar por separado ambas cosas. Dichos organismos han de financiar también programas de conservación de los recursos y de explotación de energías renovables. Y al evaluar los distintos proyectos, deberían tener presente el impacto ambiental global.

Por otra parte, los programas de ayuda financiera deberían asimismo estructurarse desplazando su peso desde el apoyo a proyectos concretos (como la construcción de embalses) hacia programas destinados a la atención de necesidades sociales (por ejemplo, dar alumbrado a más hogares). Los organismos de ayuda deberían contribuir a formar y reforzar las instituciones de los países en vías de desarrollo, a intensificar su capacidad técnica en materia energética y propiciar el salto tecnológico.

Las compañías nacionales y multinacionales pueden desempeñar un papel crucial en la promoción de saltos tecnológicos. A través de empresas mixtas con los fabricantes locales, las grandes compañías pueden transferir las últimas técnicas más eficientes a los países en vías de desarrollo.

Si el mundo subdesarrollado pudiese acceder a los fondos para poner en práctica estrategias DEFENDUS, el medio ambiente global se beneficiaría muchísimo. Sin embargo, el dinero habrá de provenir del mundo industrializado. Los fondos podrían recogerse mediante un impuesto proporcional a la contribución de cada país al total de emisiones de dióxido de carbono. Tal impuesto sería coherente con el principio "quien contamina paga", aceptado hace mucho (al menos sobre el papel) por la Organización de Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE).

Conforme vaya escaseando el capital e intensificándose la preocupación por el ambiente, a las instituciones de financiación les irá resultando cada vez más difícil el rechazo de propuestas formuladas cuantitativamente, económicamente sobrias y ambientalmente correctas. No obstante, la transición desde los enfoques orientados al aumento de la oferta energética hacia otros análisis más equilibrados va a exigir cambios fundamentales en muchos ámbitos. Por otra parte, las decisiones en materia energética no siempre atienden a criterios racionales, pues son muy poderosos los intereses velados que han crecido en torno a las industrias energéticas de tipo convencional.

¿Podrá abrirse camino la necesaria transformación de políticas energéticas en el plazo de uno o dos decenios? Dejando de lado las actuaciones de los organismos internacionales de ayuda, la esperanza de cambio más fundada reside en que se produzca una convergencia de intereses. Los países industrializados se sienten amenazados ya por las consecuencias que a escala global tendrían sobre el ambiente las estrategias tradicionales de producción de energía en el mundo subdesarrollado, y están empezando a percatarse de que contribuir a un desarrollo viable labora en su propio interés. Los movimientos ecologistas de países en vías de desarrollo están forjando alianzas con los correspondientes del mundo industrializado. Los activistas prodesarrollo están clamando ya contra las estrategias puramente centradas en la oferta, porque a los pobres no les están llegando ni las migajas de la energía adicional disponible. No resulta sorprendente que los pobres se estén agitando en contra de sistemas de energía que les han fallado por completo.

La lección es clara: los planteamientos DEFENDUS pueden resultar difíciles de poner en práctica, pero los actuales sistemas energéticos son imposibles de sostener.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MATERIALES PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA. Richard S. Glaassen y Louis A. Girifalco en *Investigación y Ciencia*, n.º 123. Diciembre de 1986.

ENERGY FOR A SUSTAINABLE WORLD. José Goldemberg, Thomas B. Johansson, Amulya K. N. Reddy y Robert H. Williams. Wiley Eastern Limited, 1988.



Energía para la Unión Soviética, Europa del este y China

Las reformas económicas y la nueva tecnología quizá permitan que las economías de planificación centralizada y las incipientes democracias se desarrollen sin ulterior deterioro del entorno

William U. Chandler, Alexei A. Makarov y Zhou Dadi

Describió Thomas Jefferson la revolución como el acontecimiento extraordinario necesario para que puedan seguir produciéndose todos los sucesos ordinarios. Los extraordinarios acaecimientos de 1989 en Europa oriental, así como las reformas económicas en China desde hace diez años y la *perestroika* soviética han sido fruto de la necesidad de aumentar el bienestar material en los países socialistas. Sin embargo, las desoladoras imágenes que del humo y el hollín relacionados con la energía ha hecho aparecer la reciente apertura nos están advirtiendo que a esas economías no se las puede mejorar a expensas del medio ambiente. Igual que en las economías de libre mercado, es allí necesaria una revolución energética.

Ciertos datos estadísticos apuntan hacia una solución. Las economías de planificación central, de la Unión Soviética, Europa del este y China, mantienen a un tercio de la población mundial y consumen un tercio de la energía mundial para producir sólo una quinta parte del rendimiento económico del mundo. La intensidad energética –cantidad de energía que se requiere para producir una cosa, una tonelada de acero, por ejemplo–, es llamativamente mayor en las economías planificadas que en las economías de mercado.

¿Cómo pueden las economías planificadas reducir la intensidad energética proporcionando, al mismo tiempo, más espacio vital, mayor disponibilidad de bienes de consumo y rentas más elevadas? ¿Se traducirán los intentos reestructuradores en un uso de la energía más amplio? Si estas economías se desarrollan con rapidez (como ha empezado a hacerlo la de China), ¿podrá moderarse su impacto sobre el medio ambiente?

La alta intensidad energética de las economías planificadas no refleja precisamente un vivir en la abundancia. Es el resultado, en parte, de su tecnología anticuada y de una excesiva inversión en industria pesada. Aunque el consumo de energía *per capita* en la Europa del este y en la Unión Soviética es parejo al de la mucho más rica Europa occidental, en aquellos países la energía se utiliza de diferente modo que en ésta: para producir, con enorme gasto energético, acero, aluminio y hormigón, en vez de fabricar en serie automóviles o electrodomésticos de uso común. Los EE.UU., por ejemplo, tienen coches suficientes para que cada ciudadano vaya en automóvil, sin que nadie haya de ocupar el asiento de atrás; la Unión Soviética tiene un coche por cada 20 personas; China sólo cuenta con un coche por cada 1000. La Unión Soviética, por otro lado, gasta 30 gigajoule (30.000 millones de joule) para producir una tonelada de acero, lo que contrasta con los 18 gigajoule con que se produce la tonelada de acero en el Japón.

Además de sus automóviles, los ciudadanos de los países más desarrollados disfrutan de viviendas mucho más espaciosas que las de sus coetáneos de las economías planificadas: 30 metros cuadrados para los europeos occidentales y 55 para los norteamericanos, en contraste con los 20 metros cuadrados, si no menos, para los soviéticos y los europeos del este, y 6,5 de promedio para los chinos. Mayor área vital suele significar que se consume más energía en calefacción y en hacer funcionar los electrodomésticos. No obstante, el gasto de energía por metro cuadrado de vivienda es en la Europa del este del 25 al 50 por ciento superior al de los EE.UU., lo que refleja la falta de controles de la calefacción en las viviendas y la inexistencia de incentivos económicos para conservar el calor y el agua caliente.

En los hogares chinos, los problemas son muy diferentes. En muchas provincias, las temperaturas invernales bajan de cero en el interior de las casas, pero el gobierno, que controla estrictamente el uso residencial del carbón, no proporciona ninguna energía para calentar los hogares. El aire acondicionado es inexistente en las viviendas, aunque en el sur y en el centro de China, durante el verano, la temperatura de puertas adentro pasa a menudo de los 35 grados Celsius, incluso a media noche.

De ordinario, un hogar chino con-

1. CONTROLES AMBIENTALES y desarrollo económico llevan varias décadas de retraso en la Europa del este con respecto a los de los países de Occidente. La manera de usar la energía es una de las causas de que el aire esté tan contaminado en esta escena de la región de Hesse.

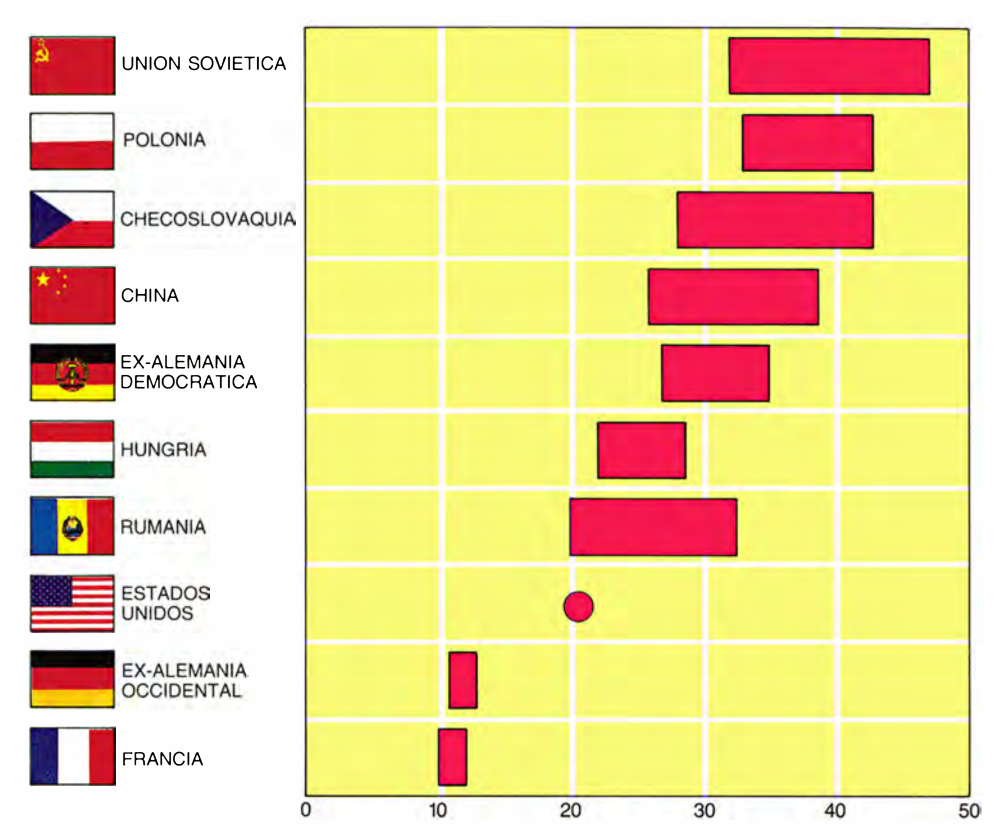
WILLIAM U. CHANDLER, ALEXEI A. MAKAROV y ZHOU DADI están investigando sobre la producción y el consumo de la energía. Chandler, titulado en ciencias por la Universidad de Tennessee y por la Escuela Kennedy de Administración de la Universidad de Harvard, dirige el departamento de estudios internacionales de vanguardia en los Laboratorios del Nordeste del Pacífico en Batelle. Makarov es doctor en economía energética por el Instituto Politécnico de Leningrado y director del Instituto de Investigación Energética perteneciente a la Academia de Ciencias y al Consejo Estatal sobre Ciencia y Tecnología de la Unión Soviética. Zhou es el director de análisis de sistemas de energía en el Instituto de Investigaciones Energéticas de China. Además, es asesor del Banco Mundial e ingeniero por la Universidad Tsinghua de Beijing.

sume 36 veces menos energía que otro occidental. El consumo medio de electricidad por hogar es de menos de 120 kilowatt-hora al año. Cualquier nevera estadounidense de cierta eficacia consume esa cantidad en dos meses. Son menos del 10 por ciento de todos los hogares chinos los que tienen siquiera un pequeño frigorífico. Muchas zonas rurales viven sin electricidad ni gas: para cocinar y para calentar el habitáculo, se queman en primitivos hornillos leña, paja y tronchos de caña. En la mayoría de los hogares chinos se sigue consumiendo carbón; siete octavas partes de la energía para viviendas provienen de este ineficiente combustible rico en azufre.

Las diferencias entre oriente y occidente en cuanto al consumo de energía han afectado a algo más que al nivel de vida. En las economías planificadas están en peligro el aire, el agua y la salud del hombre.

En la Unión Soviética, por ejemplo, la producción de energía durante el año 1989 había decuplicado el nivel máximo permisible de concentración de contaminantes del aire en 88 ciudades, habitadas en conjunto por un total de 42 millones de personas. Los embalses para proyectos hidroeléctricos cubren una décima parte del área apropiada para el desarrollo urbano e industrial y para el transporte de mercancías. Veinte grandes centrales hidroeléctricas construidas en los ríos de las llanuras han transformado los cursos en ingentes pantanos y han mermado la capacidad que esas aguas tenían de absorber los desechos. El accidente de Chernobyl mató a varias docenas de personas y contaminó 10.000 kilómetros cuadrados con niveles de radiactividad que pasaron de los 15 curies por km^2, afectando a más de 250.000 habitantes.

En la Europa del este, la contaminaón del medio ambiente –muchos de cuyos problemas guardan directa relación con la producción de energía– ha alcanzado proporciones críticas. En Polonia y en Checoslovaquia cae al mes sobre cada metro cuadrado un promedio de 12.000 microgramos de dióxido de azufre, de cuatro a ocho veces más que en la mayoría de los países de Europa occidental. Los elementos tóxicos, entre ellos plomo y arsénico, que sueltan las chimeneas de las fábricas en que se quema carbón rico en azufre, se van acumulando en el suelo y contaminan los alimentos. En las comunidades de Checoslovaquia más afectadas por este mal, a una tercera parte de los niños se les retrasa 10 meses o más el desarrollo de los huesos.

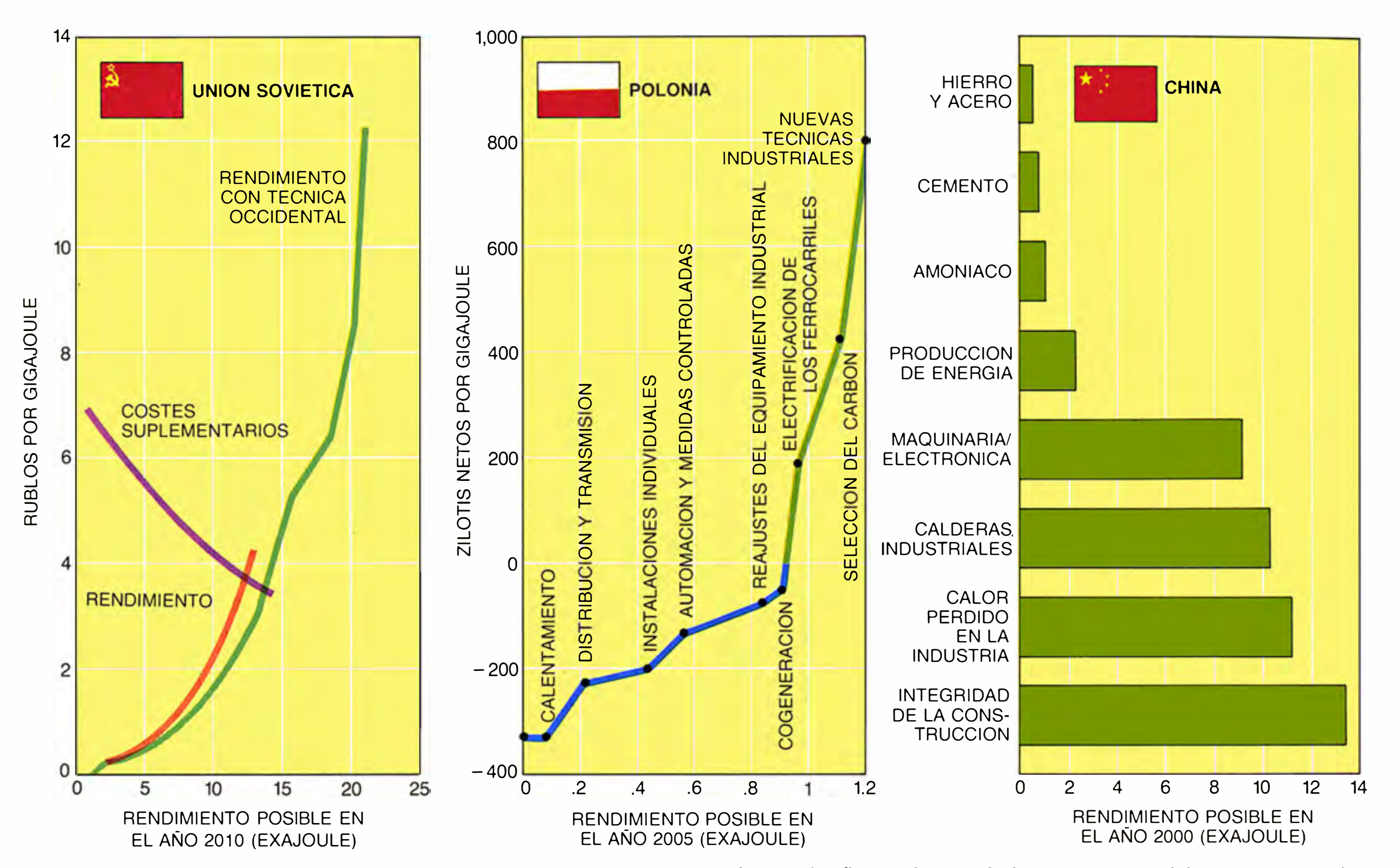


2. INTENSIDAD ENERGETICA de las economías planificadas. Es difícil de comparar con la de las economías de mercado, por las diferentes formas de medir el rendimiento económico y por la fluctuación de los tipos de cambio. Según indican las barras, los autores comparan las intensidades energéticas ateniéndose a una escala de estimaciones del producto económico ajustadas al poder de compra y a las fluctuaciones de las respectivas monedas. (Recreación realizada por Gabor Kiss.)

En China, la combustión de carbones poluciona el aire y el agua. Las partículas en suspensión suponen un grave peligro para la salud en todas las ciudades del norte del país, donde anualmente se concentra un promedio de 740 microgramos por metro cúbico. En cambio, la media anual en gran parte de los EE.UU. es de 50 microgramos por centímetro cúbico. Hoy por hoy, en China, las emisiones de azufre totalizan más de 15 millones de toneladas al año, lo que hace que el *p*H de acidez de la lluvia esté por debajo de 5 en una extensión de 1,3 millones de kilómetros cuadrados. A causa de un bajo *p*H en los suelos y de la mucha humedad, el problema adquiere particular gravedad al sur del río Yang-tze, donde el *p*H del agua de lluvia no llega, en algunas zonas, al 4,5. Sólo en la provincia de Guangdong, en la parte más meridional, las pérdidas económicas causadas por la lluvia ácida representan no menos de un 1 por ciento del producto nacional bruto. Se calcula que la pérdida económica causada en China por todas las formas de contaminación del ambiente oscila en torno al 2 por ciento del PIB.

En las economías planificadas, hay pocos aparatos de quema de carbón que estén provistos de equipo desazufrante; sólo las calderas industriales de mediano o mayor tamaño tienen dispositivos adecuados para controlar las partículas. La mayoría de los quemadores emiten humos totalmente descontrolados; rara vez se lava el carbón para reducir su contenido de azufre. El caro equipo necesario para controlar la polución no ha tenido ninguna prioridad para los planificadores, y dado el trasfondo de las dificultades económicas por que atraviesan todas las economías planificadas, no es probable que llegue a ser algo prioritario en la década de los noventa.

¿Cómo pueden las economías planificadas proteger sus entornos naturales sin desatender sus expectativas de crecimiento económico? La reforma de los precios, un paso hacia los mecanismos del mercado libre y las leyes y los patrones de la eficacia energética, desempeñarán papeles cruciales. La reforma de los precios es una forma comprobada de promover comportamientos ahorradores de energía. Cuando los EE.UU. liberaron los precios de la energía, a finales de los años setenta, ello supuso



3. POTENCIAL PARA EL RENDIMIENTO ENERGETICO en la Unión Soviética. Compara el coste de las opciones de rendimiento con el coste de la producción adicional de los recursos energéticos. El Instituto Soviético de Investigación de la Energía proporcionó los datos. El rendimiento energético en Polonia se muestra aquí en términos de costes netos: del coste de la energía eficaz se ha restado lo que cuesta suministrar otras energías ineficientes, lo que en muchos casos arroja unos costos negativos. Los datos provienen de S. Sitnicki, funcionario del ministerio polaco del medio ambiente. El potencial estimado para China supone el uso de la mejor tecnología disponible en los mercados internacionales; son datos oficiales.

para los consumidores una inconfundible señal de que había que ahorrar energía. El resultado fue que el país incrementó su desarrollo económico en un 40 por ciento entre 1973 y 1988, sin que la demanda de energía dejara en ese tiempo de mantenerse esencialmente constante. Hasta dos terceras partes de tal éxito se debieron a la respuesta del consumidor ante la subida de los precios. En la Unión Soviética, los precios han de multiplicarse por un factor de casi tres. Pero no basta con ajustar debidamente los precios, sino que además éstos han de interesar. El que los precios interesen significa impedir que las empresas hagan recaer sobre los consumidores el coste de la energía que ellas gasten. Este cambio supone ir adoptando los mecanismos del libre mercado para promover la eficacia mediante la competencia.

Sin embargo, los mecanismos del mercado no acometerán por sí solos la revolución energética en las economías planificadas. Todas las economías de mercado han de resolver aún el problema del derroche energético causado por desajustes del mercado: falta de información, control monopolístico de la producción de fuerza eléctrica y escasez de financiación, por no mencionar los despilfarros de riqueza. Por estas razones, algunas economías de mercado imponen unas reglas de resultados mínimos para todo equipo consumidor de energía, verbigracia, los automóviles o los hornos. La Unión Soviética, Europa del este y China pueden combinar las reformas de los reglamentos, de las estructuras y de los precios para cambiar la actual situación.

En la China de hoy, como en todas las economías centralizadas, los organismos gubernamentales controlan el mercado de la energía distribuyendo entre los diversos sectores el capital y los demás recursos. Por añadidura, los gobiernos locales llevan las riendas de la actividad económica y obstaculizan el intercambio de recursos entre regiones. A las minas, por ejemplo, sólo se les permite vender el carbón que exceda de unas cuotas fijas ateniéndose a un sistema de minucioso escalonamiento de los precios. El carbón "fuera del plan" puede ser vendido a industrias que lo empleen para manufacturar otros bienes fuera de lo establecido, los cuales, a su vez, pueden venderse para beneficio de los empleados.

El precio de los bienes así producidos, particularmente el del carbón, puede elevarse por encima de los niveles internacionales. Los gobiernos locales pueden también distorsionar los precios, al controlar el traslado del carbón allende los límites regionales. Peor aún, la crónica deficiencia de capacidad ferroviaria limita tales transacciones y aumenta todavía más sus costos. La escasez de carbón obliga a muchas fábricas a parar dos o tres días por semana, y muchas empresas recurren a pagar generosas sumas a los conductores de pequeños vehículos que, movidos por gasolina, transportan el carbón centenares de kilómetros.

Como mejor se estiman las posibilidades de que una economía alcance sus objetivos energéticos y de salvaguarda del entorno es haciendo proyecciones de la demanda de energía y de las emisiones resultantes. Los analistas de las economías planificadas han desarrollado recientemente modelos con que producir unos guiones que ayuden a poner en claro adónde conducirán los cambios estructurales y la nueva tecnología.



4. EL PARQUE DE TRANSPORTE de China es pequeño –con menos de cinco millones de vehículos– e ineficiente. Los camiones queman a menudo gasolina en vez del más eficaz gasoil y muchos de los viajes de retorno han de hacerse de vacío a causa de los desajustes del sistema de planificación.

Dos guiones ("escenarios") para la Unión Soviética, creados por uno de nosotros (Makarov) y sus colegas del Instituto Soviético de Investigación sobre la Energía, ilustran las vías posibles del desarrollo económico. En el primero de ellos, la transformación hacia una economía de mercado se efectúa a lo largo de un período de 10 años y sólo alcanza un éxito parcial. En consecuencia, la economía se desarrolla, por el año 2000, a un ritmo de crecimiento del 2 al 2,2 por ciento anual, aumentando a partir de entonces hasta un 2,5 a 2,8 por ciento. Tal nivel de crecimiento es el mínimo necesario para evitar la destrucción de la sociedad soviética.

El segundo marco o escenario es más optimista: da por supuesto que en los próximos cuatro o cinco años se implantarán rápidas reformas económicas; entre ellas, el paso a la fijación de precios por el mercado y a la producción competitiva de bienes y servicios. Estos cambios impulsarían el crecimiento hasta un ritmo anual del 3 por ciento entre 1991 y 1995, y lo acelerarían hasta el 3,8 por ciento en los años siguientes.

Según el guión pesimista, el espacio de vivienda *per capita* no alcanzaría hasta el año 2030 los niveles europeo-occidentales de un promedio de 30 metros cuadrados. Según el segundo guión, este nivel se alcanzaría por el año 2015.

Los bienes de consumo se habrían triplicado para el 2030 en el supuesto pesimista y, para el 2010, en el optimista. la Unión Soviética no llegaría al nivel europeo-occidental de coches *per capita* hasta pasado el 2030 en el supuesto pesimista, mientras que, en el optimista, alcanzaría ese nivel hacia el año 2025.

La reestructuración de la economía soviética tiene importantes implicaciones respecto a la conservación de la energía. El gasto de materiales *per capita* es allí muy grande en comparación con el de otras naciones; las reformas del mercado tendrían dos efectos: producir menos material innecesario y, al haber de competir los fabricantes por la conquista de mercados sensibles a los precios, aprovechar mejor los materiales en las fábricas, en la elaboración y en el embalaje y transporte. Según el marco optimista, la reforma estructural podría reducir una sexta parte la demanda soviética de energía a lo largo de las dos próximas décadas.

La URSS podría ahorrar aún más energía aplicando la avanzada tecnología de que dispone. Entre sus importaciones de Occidente, gozan de prioridad los sistemas de iluminación eficaces, las centrales eléctricas, los hornos industriales y todo cuanto permita controlar electrónicamente los motores industriales para que la velocidad de la maquinaria sea la requerida por cada trabajo. Introduciendo la mejor tecnología durante los próximos 20 años, se reduciría en un tercio la futura demanda de energía.

A los economistas soviéticos les preocupa el hecho de que la excesiva inversión en producir energía está frenando el desarrollo económico. La inversión anual en producir petróleo, gas natural y carbón ha llegado a ser casi el 20 por ciento del total de las inversiones anuales. La meta deseable es reducir esta proporción a un 17 por ciento en el próximo quinquenio, y al 13 por ciento a comienzos del siglo XXI.

El rendimiento energético es crucial para la *perestroika*: permitirá dedicar a la modernización de la industria y de la agricultura recursos domésticos escasos tales como el capital y las capacidades técnicas, a la vez que dejará exportar petróleo y gas que traigan divisas fuertes.

Un guión o escenario para el desarrollo en los países de la Europa del este da por supuesto que crecerán a un ritmo del 3 por ciento anual. Esta velocidad de crecimiento representa un futuro optimista en el que los planificadores hallan cómo mantener su pasado desarrollo económico sin cambiar radicalmente sus economías. Las tendencias actuales harían que la demanda de energía aumentara en casi un 50 por ciento (de 20 a 31 exajoule) para el año 2025. (Un exajoule es 10^{18} joule.) Pero, lo mismo que en la Unión Soviética, combinando la reforma económica con la introducción de tecnología que saque el máximo partido a la energía empleada, podría mantenerse virtualmente constante la demanda de energía.

La reforma obligaría a cerrar factorías que, por las imposiciones de precios bajos, producen una alta proporción de artículos de mala calidad o innecesarios. En Checoslovaquia, por ejemplo, la producción de acero podría reducirse a la mitad de su actual nivel, de casi 16 millones de toneladas al año, mediante un menor gasto. Para la producción de otros metales y de sustancias químicas, se han recomendado cambios aún más espectaculares. El cambio de estructuras reducirá la función de la industria pesada en la economía nacional, incrementando la fabricación de bienes de consumo y dando auge al sector de los servicios.

Polonia es el mayor productor y consumidor de energía en la Europa del este. A su cargo corre una tercera parte de los 20 exajoule que gastan cada año esos países. Hasta hace bien poco, para la electricidad, el carbón y el gas natural polacos el precio res-

pectivamente fijado era una cuarta parte, la mitad y cuatro quintas partes del que solían tener en el mercado mundial. Sin reforma económica, la economía polaca duplicaría hacia el año 2025 su consumo energético. Por contra, una combinación de reforma y aprovechamiento de la energía haría que la demanda de ésta se mantuviera estable durante ese período.

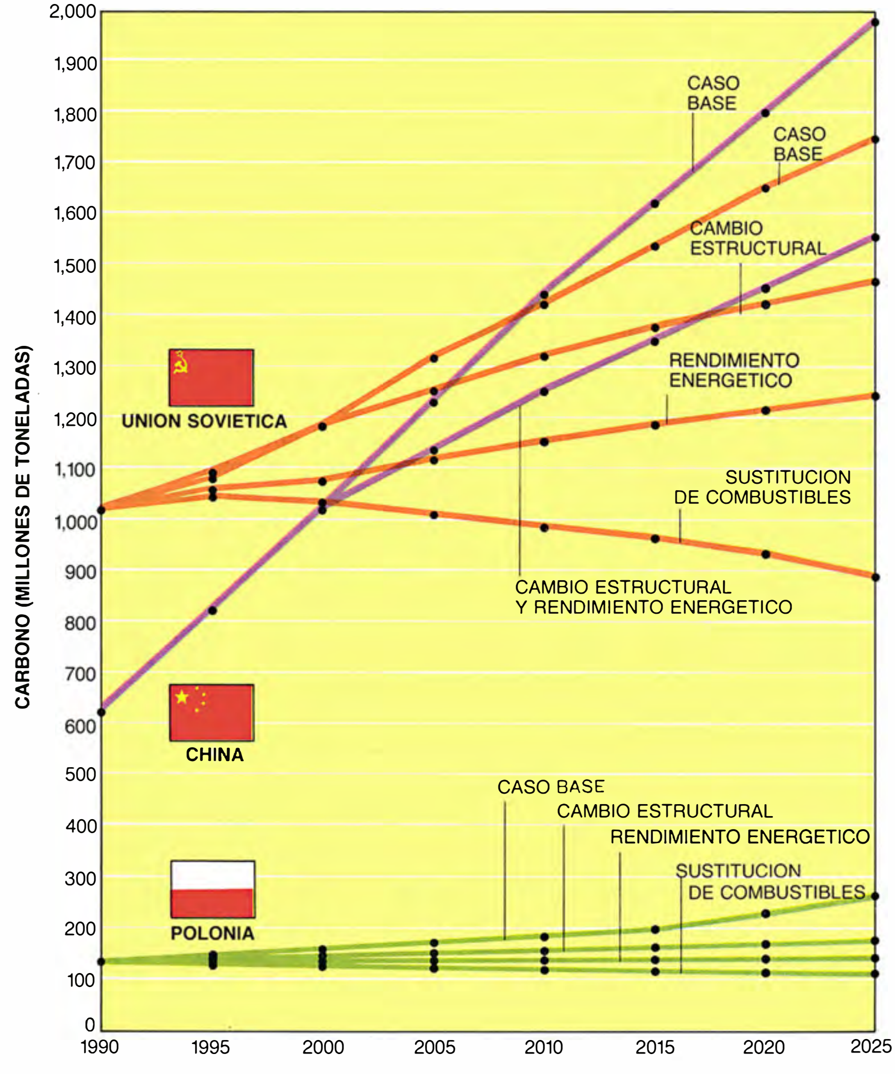
En el sector industrial, los motores energéticamente eficientes, la automoción y cogeneración de los procesos (generando simultáneamente electricidad y calor para los procesos industriales o para el calentamiento de agua o de espacio) supondrían cuantiosos ahorros. Al mismo tiempo, la medición con contadores y el control individual de los sistemas de calefacción y de calentado del agua en las viviendas, junto con reparaciones y mejor manejo de los sistemas de calefacción en los locales públicos y en las oficinas, permitirían acomodar el doble de espacio habitable con sólo un 15 por ciento de aumento en el consumo de energía.

Polonia es el cuarto productor mundial de carbón y obtiene de éste tres cuartas partes de su energía doméstica. Además de los graves problemas que comportan la lluvia ácida y las partículas en suspensión, la minería del carbón impone a la economía pesadas cargas suplementarias. Consume una quinta parte del acero que se usa en el país, para la armazón, el entibado y el techado de las minas, y una décima parte de la fuerza eléctrica. La producción de carbón se va haciendo cada año más difícil y costosa, porque los filones se están agotando. La profundidad media de las minas es de 600 metros, y cada año la de las nuevas minas aumenta de 10 a 20 metros. Reducir la demanda de carbón dejaría capital libre para usos más productivos en otras ramas de la economía y reduciría la carga de partículas, azufre y demás emisiones tóxicas procedentes de su combustión.

Las rentas de los europeos del este irán creciendo probablemente hasta alcanzar los niveles occidentales, lo que sucederá también con el espacio de vivienda *per capita*, hacia el año 2025. Frigoríficos más capaces y un mayor número de lavadoras y secadoras, de acondicionadores de aire y de electrodomésticos de uso personal significarán más altas intensidades energéticas, a pesar de la mejora en el calentamiento de agua y de espacio. Si no se adoptasen las políticas convenientes, la demanda de energía se doblaría, de lejos, hacia el año 2025 (pasaría de los 5,2 a los 12,5 exajoule). Un comportamiento realista que ponga precios idóneos a la energía, que mida con contadores su empleo y que establezca normas de eficacia de los electrodomésticos podría mantener la demanda al nivel de los 7,6 exajoule.

A medida que las rentas vayan aumentando en la Europa del este, crecerá también la demanda de transporte. Con los automóviles derrochadores hoy en uso, la demanda de energía para el transporte se duplicaría y resultaría muy cara, puesto que precisaría casi con certeza que se incrementaran las importaciones de petróleo en un millón de barriles diario. Los coches de la Europa del este consumen en la actualidad un promedio de 8,7 litros por cada 100 kilómetros, gasto excesivo, por cuanto se trata de automóviles de poco peso y escasa potencia. Pero aumentar la economía del combustible en los automóviles hasta 5 litros por cada 100 kilómetros e igualar el tamaño de los camiones y sus fuerzas y capacidades de carga puede contribuir a mantener la demanda de energía para el transporte al nivel de los 3,4 exajoule, lo que supone un 50 por ciento de aumento sobre los niveles de 1985.

Pocos países aprovechan peor la energía que China. En 1988 consumió por lo menos tres veces más energía por cada unidad de producción económica que la que consumió el Japón. Por otro lado, su incesante uso energético no puede atribuirse a su "fase de desarrollo", pues otros países en vías de desarrollo, como Corea del sur, obtienen parecidas proporciones de su renta nacional con la industria pesada, que tanta energía requiere, y, sin embargo, gastan mucha menos energía. Exhaustivos estudios realizados por el Banco Mundial de-



5. COMBINACION de reforma económica y rendimiento energético, que brinda las mejores oportunidades para reducir el auge de las emisiones de dióxido de carbono. En un país tan pobre como China, no se ha de pretender, sin embargo, acabar del todo con las emisiones contaminantes, sino que hay que procurar que su aumento se mantenga a un mínimo. Los datos para la Unión Soviética proceden del Instituto soviético de Investigación Energética; los de Polonia los proporcionó S. Sitnícki; los cálculos para la proyección china se deben a un equipo que dirige J. Sathaye, en Berkeley.





6. CANTIDAD METROS CUADRADOS de la vivienda soviética (*izquierda*) y de la china (*derecha*): sólo la mitad y una cuarta parte, respectivamente, de la de los hogares franceses. Mientras los soviéticos disfrutan de las comodidades básicas de la vida moderna –calefacción, agua caliente, refrigeración, televisión–, son muchos los chinos que no tienen calefacción ni frigoríficos y sólo agua fría. China será incapaz de satisfacer las demandas de energía que tales comodidades requieren, si no usa las más eficaces tecnologías, edificaciones y sistemas de producción de energía.

muestran que la intensidad energética en la producción de acero dobla en China la nipona; la del transporte con camiones dobla la americana.

China ha hecho, sin embargo, un impresionante progreso, reduciendo un 4,7 por ciento anual la energía requerida por unidad de producción económica a lo largo de la última década. Cierto es que la intensidad energética era al comienzo tan elevada, que las reducciones fueron fáciles; pero, en cuanto a ese logro, sigue China destacándose sin par entre las demás naciones en vías de desarrollo. En 1980, los dirigentes chinos se propusieron de veras alcanzar esa meta, porque reconocieron que, si no, les sería físicamente imposible suministrar la cantidad de energía necesaria para ver realizados sus ambiciosos proyectos de desarrollo económico. El crecimiento de la economía china –dificilísimo de evaluar en términos occidentales– puede que haya rondado el 10 por ciento anual durante los últimos diez años, mientras que el uso de carbón aumentó sólo a la mitad de ese ritmo. Y del carbón salen las tres cuartas partes de la energía que se consume en China.

Un guión plausible para la economía china exigiría un continuo crecimiento económico, al ritmo aproximado del 5 por ciento anual, durante las tres próximas décadas. Aun cuadruplicando así su renta *per capita*, el nivel a que llegaría ésta en el año 2025 sería tan sólo un tercio del que se disfruta actualmente en los EE.UU. La población aumentará hasta 1400 millones, a no ser que se cumpliera la política de un hijo por familia, y parece que en las zonas rurales está fracasando. La cantidad de automóviles ascendería hasta uno por cada 50 personas. La demanda de energía para usos residenciales se incrementaría en casi un 50 por ciento. En conjunto, la demanda china de energía llegaría más o menos a triplicarse respecto a la actual (pasaría de los 33 a los 86 exajoule) en el año 2025.

El auge de la demanda plantea un formidable problema de suministro. El consumo de petróleo pasaría de los dos millones de barriles diarios a casi siete. Se triplicaría el consumo de carbón. Incluso con la reforma de los precios, con la reestructuración de la energía y con la implantación de moderadas normas de eficiencia técnica, el gasto total de energía aumentaría hasta los 75 exajoule, y la mayor parte de tal energía sería suministrada por el carbón. Las emisiones de dióxido de carbono subirían de los actuales 580 millones de toneladas por año hasta 1500 millones, con un aumento global para las emisiones de carbono equivalente al 17 por ciento del nivel actual. Hacer que converjan las mejoras económicas y la protección del medio ambiente en un país tan pobre como ése supondrá todo un desafío. La meta de la reducción de las emisiones de carbono, por ejemplo, no ha de ser acabar con ellas, sino mantener al mínimo su aumento.

Cada uno de estos esbozos de guión plantea nuevos interrogantes: ¿Cómo se podrá satisfacer la creciente demanda de petróleo? ¿Qué parte le corresponderá al carbón, que se ha convertido en una amenaza para la bioesfera? Y ¿qué decir de la energía nuclear? ¿Podrá el gas natural compensar las deficiencias energéticas? Y, en tal caso, ¿de dónde vendrá?

El petróleo sigue siendo una cuestión clave en las economías planificadas. La Unión Soviética, que es con mucho el mayor productor mundial de petróleo, suministrando una quinta parte de la producción total del mundo, podría probablemente mantener su actual nivel de suministro hasta el año 2010. Este cálculo supone el aumento mundial de los precios del crudo y la adopción de la tecnología occidental con miras a conseguir la producción máxima. En cuanto a las pequeñas cantidades de petróleo que se producen en la Europa del este, cabe estimar que continuarán disminuyendo.

China ocupa el sexto lugar en la escala de los productores mundiales de crudo, con 2,7 millones de barriles diarios, y podría proseguir así durante unos 13 años con sus comprobadas reservas. Las cuencas sedimentarias ricas en petróleo se extienden en China unos 5,5 millones de kilómetros cuadrados y, teóricamente, contienen alrededor de 550.000 millones de barriles de crudo. Pero la exploración y el desarrollo de pozos se ven limitados por la falta de equipamiento moderno y de capital.

Para la Unión Soviética se contempla un auge moderado de la producción de carbón, con un aumento de la energía que de unos 13 exajoule en 1990 pasará a 17 o menos en 2010.

El futuro del carbón es más sombrío en la Europa del este, donde los problemas económicos y ambientales hacen muy indeseable su empleo. Las reservas de carbón durarían en China, al ritmo actual de su consumo, mil años. Y esta ingente cantidad ni siquiera requeriría que los mineros bajasen a profundidades mayores de los 1500 metros.

La Unión Soviética prevé una expansión sólo moderada de su industria de fuerza nuclear, que puede llegar a ser de 45 a 65 megawatt hacia el año 2000 y de los 60 a los 100 hacia el 2010. Pero aun este pronóstico está condicionado al rápido desarrollo de reactores seguros y de razonable cos-

te. La energía nuclear se ha convertido en tema de controversias en Polonia, Checoslovaquia y Hungría. Polonia no tiene en activo ningún reactor atómico y no es probable que termine los que están en construcción. China posee la capacidad técnica para producir reactores de hasta 600 megawatt de potencia, pero las inversiones de capital y de divisas que necesitaría para ello –y sus enormes reservas de carbón a bajo coste– hacen improbable allí el despliegue a gran escala de la energía nuclear.

Las inmensas reservas de gas natural que posee la Unión Soviética sugieren la posibilidad de una atractiva estrategia energética, un puente de gas hacia el futuro. La URSS pretende conseguir un aumento de la producción de gas que pase de los 29 exajoule de 1988 a 35 para el año 2000 y 38 para el 2010. Esta posibilidad abre muchas otras perspectivas. Una opción prometedora es la de reorientar el sector utilitario. Los suministros de gas natural podrían ampliarse mucho, adoptando sistemas de ciclos combinados altamente eficientes que produjeran electricidad y vapor para la vivienda o la industria. La tecnología iría reduciendo los problemas ambientales de la Unión Soviética relacionados con el carbón y con la energía nuclear y permitiría conservar gas para la exportación.

La perspectiva de una mayor dependencia del gas soviético en la Europa del este es muy atractiva. Sin embargo, se han de cumplir tres condiciones antes de que pueda hacerse realidad. Primeramente, es imprescindible la reforma económica para evitar que el recurso se despilfarre. En segundo lugar, es necesaria una recuperación económica que capacite a la Europa del este para ganarse divisas con las que pagar el gas soviético. En realidad, el mero poner los precios de importación del crudo y del gas soviéticos y los de exportación de los productos propios al nivel de los precios del mercado mundial le costaría al conjunto de los países de Europa oriental por lo menos 10.000 millones de dólares al año. En tercer lugar, ha de introducirse en la Europa oriental una eficacísima tecnología para turbinas de gas y vapor en ciclos combinados. Esta tecnología ayudaría a aprovechar al máximo el recurso y a mantener asequibles los costos. Una vez más, sin embargo, el problema de las divisas suele impedir la adquisición de la tecnología.

Una solución para el problema de las divisas sería que se crearan mutuas asociaciones entre las industrias soviéticas y de Europa oriental, los fabricantes occidentales de turbinas de gas y vapor y los productores de gas soviéticos, con el fin de financiar la producción de equipamiento para el uso del gas y el suministro del mismo a los consumidores de la Europa del este. Con ello, los europeos orientales ganarían un sistema de energía más limpia y más productiva, los soviéticos un mercado para su gas y los países de occidente mercados para sus exportaciones. El mundo entero se beneficiaría, al reducirse considerablemente las emisiones de carbono y azufre a la atmósfera.

En Siberia oriental y en la plataforma del mar de Ojotsk podrían extraerse grandes cantidades de gas natural, algunas de las cuales podrían exportarse a China, Corea y Japón. Recientemente se ha considerado en la Unión Soviética y en algunos países asiáticos la posibilidad de exportar gas a Corea a través del nordeste de China. Los yacimientos próximos a Yakustk o los que hay en torno a la isla de Sajalín podrían suministrarle a China de dos a tres exajoule por año, esto es, un 10 por ciento de la energía que este país necesita. Entre las trabas que impiden hacerlo realidad, se incluyen la de las divisas para que pague el gas y la de la imprescindible aportación de tecnología extranjera a los yacimientos de Sajalín (pues se requieren instalaciones de extracción alejadas de la costa).

La Unión Soviética podría cubrir sus necesidades domésticas de energía explotando recursos de superior calidad. El petróleo y el gas seguirían así representando alrededor del 80 por ciento del suministro total de energía soviético. Según la visión optimista de la reforma económica, el total de las exportaciones soviéticas de energía a Europa apenas disminuiría; la merma de los embarques de petróleo se compensaría con la creciente transmisión de gas natural.

Según los cálculos a que venimos refiriéndonos, el auge de las emisiones causantes del efecto de invernadero podría reducirse en la Unión Soviética en unos 255 millones de toneladas hacia el año 2010, aproximadamente una cuarta parte de las actuales emisiones. De manera parecida, las emisiones de gases tóxicos se podrían rebajar de un 30 a un 40 por ciento de los niveles que hoy alcanzan.

Existen también en la Europa del este oportunidades para reducir las emisiones de carbono. En Polonia, por ejemplo, si se quisiera, para el 2010 podrían haberse rebajado las emisiones de dióxido de carbono en un 20 por ciento, con unos costes de sólo alrededor del 0,3 por ciento de su producto nacional bruto. Esta posibilidad depende en parte de la disponibilidad, a precios asequibles, del gas natural soviético. Polonia no será capaz de resolver sus problemas energéticos y económicos sin hacerse con las tecnologías occidentales. Pero, dada la enorme deuda externa que pesa sobre el país, no es probable que recurra a nuevos empréstitos para importar productos o sistemas tecnológicos. La asociación con empresas occidentales sería un modo importante de transferir tecnología, ya que esas empresas aportarían su experiencia técnica además de la necesaria financiación. Parece ser que los dirigentes polacos comprenden la importancia de que el precio de la energía señale bien la realidad, y que la reforma y la competencia de los precios reducirán mucho la demanda de más energía.

Si la comunidad internacional participa activamente en transferir tecnología de ahorro energético, se lograrán resultados más llamativos. Los gobiernos occidentales pueden contribuir financieramente a este esfuerzo concediendo préstamos con garantías, créditos o, inclusive, financiación directa. Podrían establecer unos fondos para la conservación de la energía valiéndose de las instituciones existentes o creando otras nuevas con este fin. Tales fondos, empero, siempre serán limitados. Las asociaciones mutuas con el sector privado occidental pueden servir de ayuda. Pero lo que hay que hacer, sobre todo, es concentrar los recursos internos dejando de destinar tan enormes cantidades de dinero a fines militares y a la forma tradicional de suministrar energía. Así, Stanislaw Sitnícki, asesor en jefe del ministerio polaco del medio ambiente, sostiene que su país debería simplemente suspender toda nueva inversión en suministros mientras no tuviese ordenado el sector de su demanda interna.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE SOVIET UNION: A STRATEGY OF ENERGY DEVELOPMENT WITH MINIMUM EMISSION OF GREENHOUSE GASES. A. A. Makarov and I. A. Bashmakov. Pacific Northwest Laboratories, abril de 1990.

POLAND: OPPORTUNITIES FOR CARBON EMISSION CONTROL. S. Sitnícki, A. Szpilewicz, J. Michna, J. Juda and K. Budzinski. Pacific Northwest Laboratories, mayo de 1990.

CARBON EMISSIONS CONTROL STRATEGIES: CASE STUDIES IN INTERNATIONAL COOPERATION. Dirigido por W. U. Chandler. Conservation Foundation (en prensa).



Energía de combustibles fósiles

Mientras los recursos alternativos no ocupen el lugar del carbón, el petróleo y el gas natural, las nuevas técnicas deberán extraer la máxima energía de esa vieja fuente minimizando sus efectos negativos sobre el entorno

William Fulkerson, Roddie R. Judkins y Manoj K. Sanghvi

Los combustibles fósiles plantean un dilema a nuestra sociedad. La combustión del carbón, petróleo y gas natural suministra el 88 por ciento de la energía que consumimos y posibilita el ritmo de vida de nuestra civilización. Sin embargo, los gases emitidos durante la combustión degradan el entorno, hasta alterar, quizás, el clima y amenazar la habitabilidad futura del planeta.

Las técnicas que se están desarrollando deberían tener como objetivo mitigar las dos principales perturbaciones producidas, a escala regional, por la combustión de los productos fósiles: la lluvia ácida y la suciedad de la atmósfera urbana, el "smog". Han de buscarse también soluciones para un tercer problema, más devastador en potencia que los anteriores: el incremento global del calentamiento, provocado por un aumento de los niveles de CO_2 y otros gases responsables del efecto de invernadero en la atmósfera. El CO_2 se emite siempre que los combustibles fósiles se queman y, al igual que otros gases de invernadero, captura el calor irradiado por la tierra y lo mantiene cerca de la superficie.

El problema del calentamiento global es difícil de resolver. Existen discrepancias sobre la realidad y peligrosidad de esta amenaza y, consecuentemente, sobre la cantidad de dinero y esfuerzo necesarios para hacerle frente. Incertidumbre que no debe servir de excusa para inhibirse.

La sociedad necesita encontrar seguridades técnicas que permitan prevenir el cambio climático global sin tener que recortar de forma drástica y precipitada el consumo de combustibles fósiles. Han empezado a surgir estrategias, bastante baratas y que vale la pena tomar en consideración; van desde un mayor rendimiento de la combustión, que reduciría las emisiones al producir más energía con la misma cantidad de combustible, hasta la adopción de nuevas fuentes de energía no fósiles que pudieran ser sustitutos económicos a gran escala.

Si la degradación ambiental no fuerza el cambio a otros combustibles alternativos, será el suministro limitado de los fósiles el que inducirá esa transición, quizás en uno o dos siglos. Los suministros fósiles proceden de plantas y animales que murieron hace milenios y quedaron sepultados en pantanos, lagos y mares. Queda todavía mucho combustible, carbón, sobre todo. Pero las reservas se consumen a una velocidad muy superior a la de su reposición.

Existen poderosas razones que explican la popularidad de los combustibles fósiles. En primer lugar, su carácter asequible, en una forma u otra, en todo el mundo. En segundo lugar, el hombre ha aprendido a explotarlos de manera eficaz y relativamente limpia para producir la energía que necesita. La técnica bastante simple de la combustión controlada proporciona energía aplicable a cualquier escala. Tercero, resultan unos excelentes combustibles para el transporte porque son fáciles de almacenar, proporcionan gran cantidad de energía química y el oxígeno que precisa la combustión abunda en el aire. Por último, destaca su fácil interconversión, de sólido a líquido o gas; constituyen, además, unas excelentes materias primas para la fabricación de productos químicos y plásticos.

Por todas esas razones, y porque pasarán muchas décadas antes de que se desarrollen y adopten energías alternativas competitivas, los combustibles fósiles continuarán siendo, durante bastante tiempo, los protagonistas. Habrá, pues, que desarrollar técnicas capaces de reducir los efectos nocivos de la combustión, como son la lluvia ácida, la contaminación del aire urbano y el calentamiento global. Por supuesto, la contaminación del medio ambiente no es el único problema que presentan los combustibles fósiles. La estabilidad del mercado del petróleo y la seguridad energética son también motivos de preocupación, pero no tenemos suficiente espacio para analizarlos aquí.

La solución al primer problema ambiental, la deposición ácida, reside en el control del desprendimiento del dióxido de azufre (SO_2) y los óxidos de nitrógeno (NO_x), que se convierten en ácidos al combinarse con el agua de la atmósfera. La ignición de combustibles fósiles, especialmente del carbón, produce más del 80 por ciento del SO_2 y la mayoría de los NO_x emitidos a la atmósfera por la actividad humana. El nitrógeno procede de los combustibles y del aire y se combina con el oxígeno para formar los NO_x cuando las temperaturas de combustión son elevadas.

1. GASEODUCTO de Texas, donde abunda el gas natural y puede sustituir rentablemente al carbón. El gas natural produce una combustión más exhaustiva, es más limpio y genera sólo la mitad de CO_2 por unidad de energía producida.

WILLIAM FULKERSON, RODDIE R. JUDKINS y MANOJ K. SANGHVI son, respectivamente, el director de sistemas de energía avanzados en el Laboratorio de Oak Ridge, director del programa de energía fósil en Oak Ridge y director de análisis industriales y pronósticos en la empresa Amoco. Fulkerson supervisa algunas divisiones y programas en Oak Ridge, incluido el que encabeza Judkins, quien está al frente de la investigación del laboratorio relacionado con el desarrollo de la energía fósil. A Sanghvi cumple analizar, interpretar y prever la demanda, precios y suministro mundial del petróleo, gas y otras fuentes de energía.

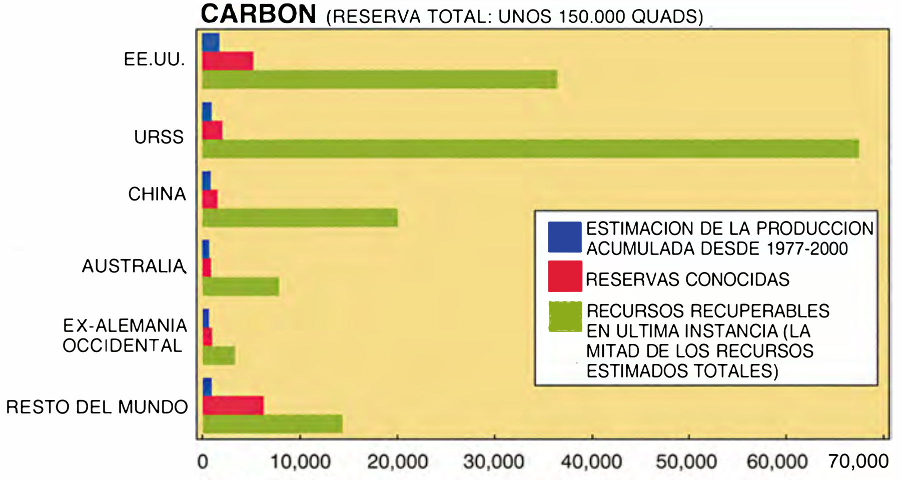
El éxito en la reducción de los NO_x comportaría la reducción de la neblina urbana, resultado de la activación solar sobre los NO_x, el monóxido de carbono (CO) y ciertos compuestos orgánicos. Gran parte de la contaminación urbana viene provocada por los vehículos, que funcionan exclusivamente con derivados del petróleo. Debemos señalar, sin embargo, que se han realizado notables progresos para reducir las emisiones de los vehículos y que las normativas dictadas por algunos países van a contribuir probablemente a reducirlas más. Desde luego, el imperativo de mejorar la calidad del aire urbano puede estimular experimentos a gran escala con combustibles y motores alternativos e incluso con sistemas de transporte. Tales experimentos podrían aportar nuevas ideas sobre las formas de controlar las emisiones de gases de invernadero en el sector del transporte.

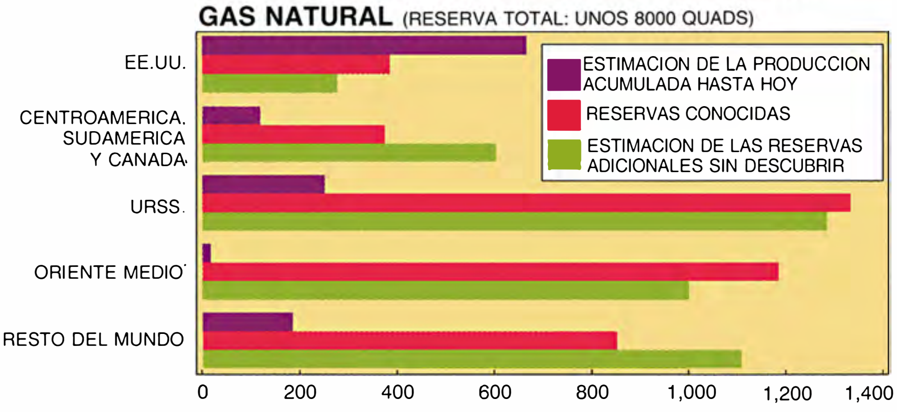
La combustión del carbón genera más de la mitad de las emisiones de SO_2 y el 30 por ciento de las de NO_x. Esto ha llevado a la búsqueda de proyectos técnicos capaces de rebajar la producción de los gases en las centrales eléctricas que funcionan con tal combustible. En las centrales térmicas tradicionales, el carbón pulverizado se quema en una caldera, donde el calor vaporiza el agua en cañerías. El vapor generado hace girar las paletas de la turbina y la energía mecánica se convierte en eléctrica mediante un generador. Los gases producidos en la caldera durante la combustión, entre ellos SO_2, NO_x y CO_2, viajan desde la caldera hasta un eliminador de partículas; de aquí pasan al aire a través de la chimenea. Estas plantas trabajan con un rendimiento del 37 por ciento.

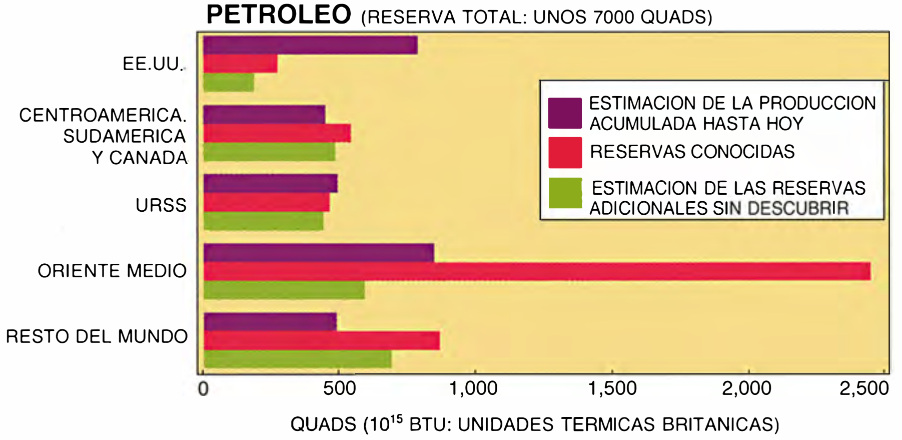
El método más utilizado para reducir las emisiones de SO_2 es el lavado de los gases procedentes de la combustión. En las instalaciones ya existentes, los gases emitidos se ponen en contacto con una piedra caliza ($CaCO_3$) u otros absorbentes que reaccionan con los gases, formando un compuesto que se elimina en forma de residuo sólido. Con la puesta en práctica del método del lavado y el uso de carbones de bajo contenido en azufre, se ha llegado a disminuir en un 33 por ciento las emisiones de SO_2 durante los últimos 15 años en EE.UU. Dato muy significativo, si se tiene en cuenta que en este período de tiempo el uso del carbón creció en un 50 por ciento. Las emisiones de NO_x, por el contrario, han permanecido relativamente constantes. Los sistemas de lavado convencionales pueden reducir las emisiones de SO_2 desde el 50 al 90 por ciento, aunque con cierto coste sobre la eficacia. Las centrales de vapor equipadas con el método de lavado tienen una eficacia del 34 por ciento; es decir, sólo una tercera parte de la energía química almacenada en el carbón se convierte en electricidad mientras que el resto se pierde o se retrae para el funcionamiento mecánico de la propia central.

Algunos procesos de lavado más avanzados eliminan el 97 por ciento del SO_2 y, según el absorbente utilizado, pueden también reducir la emisión de NO_x. Después de la combustión, los NO_x pueden eliminarse mediante una reducción catalítica selectiva; el amoníaco (NH_3) se mezcla con los gases de combustión y, al reaccionar con los NO_x, forma sustancias más benignas, como agua y nitrógeno molecular (N_2), componente principal del aire.

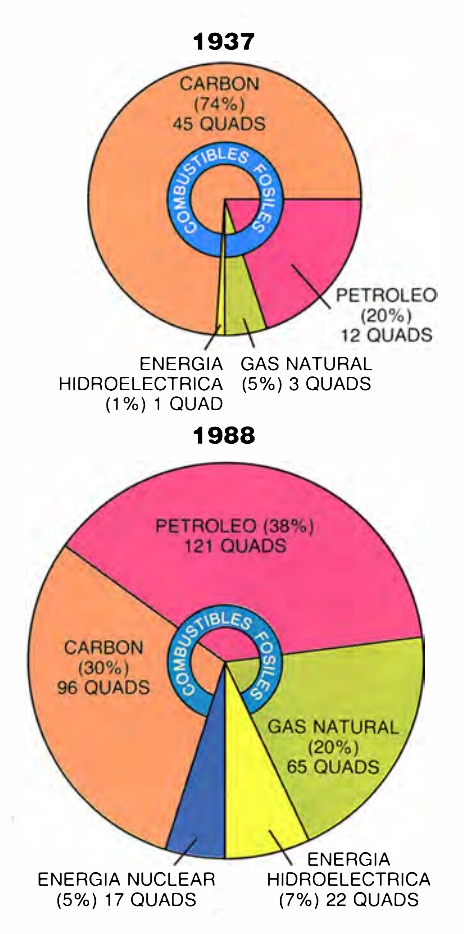
Antes de quemar, el carbón puede también lavarse de parte de su contenido de azufre. Los métodos de procesado comercialmente disponibles trituran el carbón y lo separan en partículas según su densidad. Con ello se elimina un 30 por ciento del azufre. Hay en estudio propuestas

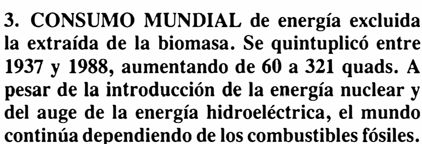




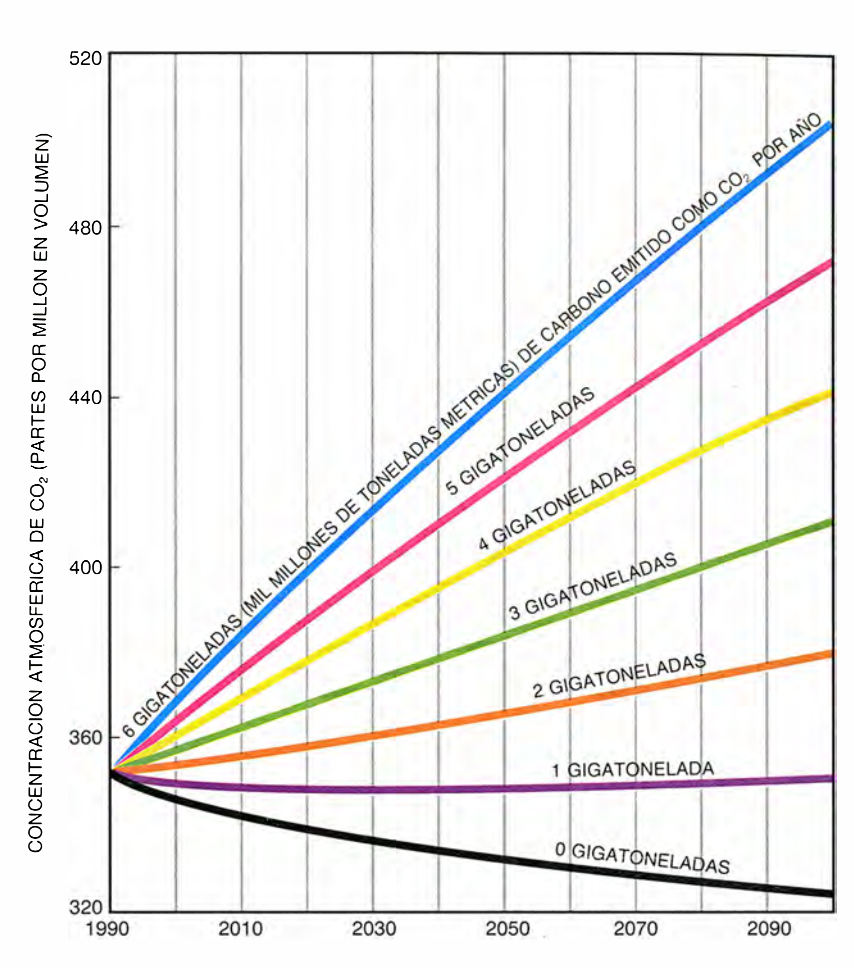


2. COMBUSTIBLES FOSILES recuperables económicamente. No se distribuyen de manera uniforme. Al ritmo de consumo de 1988, las reservas de carbón, gas natural y petróleo podrían durar 1500, 120 y 60 años, respectivamente. Sin embargo, la producción procedente de las fuentes no tradicionales podría doblar el tiempo de duración para los casos del gas natural y el petróleo.





3. CONSUMO MUNDIAL de energía excluida la extraída de la biomasa. Se quintuplicó entre 1937 y 1988, aumentando de 60 a 321 quads. A pesar de la introducción de la energía nuclear y del auge de la energía hidroeléctrica, el mundo continúa dependiendo de los combustibles fósiles.



4. CONCENTRACION ATMOSFERICA de dióxido de carbono y contribución al calentamiento global, según las previsiones de William R. Emanuel, del Laboratorio de Oak Ridge. Se supone que los ritmos actuales de emisión de CO_2 de origen antropogénico cambiarían repentinamente hacia los valores indicados en la figura y se mantendrían después. Para estabilizar la concentración atmosférica, las emisiones actuales de cerca de 6 gigatoneladas de carbono por año deben disminuir hasta una gigatonelada, aproximadamente un sexto de lo que es hoy; se trata de un cambio difícil de lograr.

mecánicas más eficaces y nuevos métodos químicos, e incluso biológicos.

Otras técnicas que requieren solamente una retroalimentación pueden eliminar también parte del SO_2 o NO_x durante la etapa de la combustión. El azufre, por ejemplo, puede desecharse introduciendo en la caldera piedra caliza junto con el carbón. Las emisiones de NO_x pueden controlarse mediante el descenso de las temperaturas de combustión (a temperaturas más bajas se forma menos NO_x). Esto se consigue introduciendo vapor en la zona de combustión.

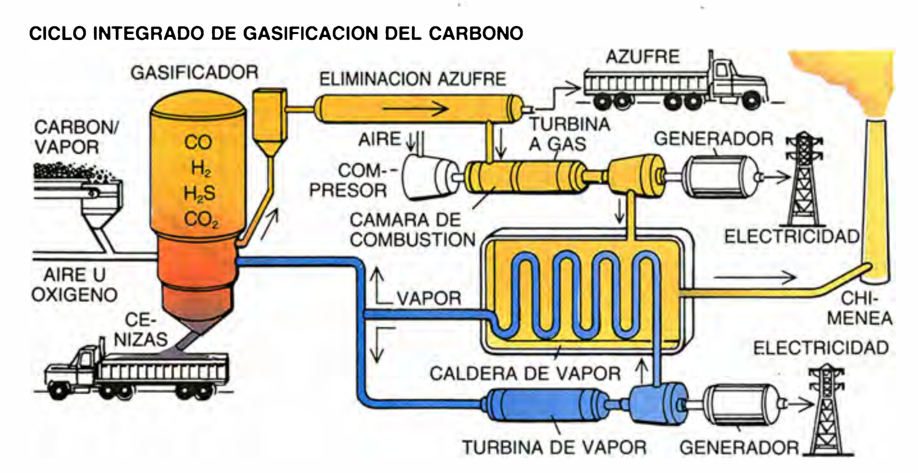
Las emisiones no deseadas pueden reducirse sustituyendo equipos envejecidos por otros más avanzados y rentables. Este procedimiento puede resultar más rentable que el de la retroalimentación. Así, un viejo sistema generador de energía puede dejar su sitio a otro formado, no por una caldera convencional, sino por un nuevo tipo de cámara de combustión, como la cámara de lecho fluidizado a baja presión (CLFB) o a presión elevada (CLFP).

Ambos sistemas, que tienen en la actualidad un uso comercial limitado en la industria y los usos domésticos, queman carbón con piedra caliza o dolomita en una mezcla suspendida por chorros de aire. Esta mezcla, o lecho fluidizado, y los gases calientes de la combustión cubren los tubos que generan el vapor. La piedra caliza absorbe alrededor del 90 por ciento del azufre que se emitiría normalmente en forma de SO_2. La agitación constante facilita la combustión del carbón y la transferencia de calor a las tuberías. En estos sistemas, la temperatura de combustión puede ser menor que en una caldera convencional, con la consiguiente reducción de NO_x.

Otros sistemas más avanzados sobre la versión atmosférica mantienen en la caldera una presión de 6 a 16 veces superior a la presión atmosférica normal. La eficacia de este sistema radica en la posibilidad de usar los gases calientes de la propia cámara de combustión, generando un ciclo combinado. A medida que el vapor producido en las tuberías del generador impulsa una turbina de vapor convencional, los gases a presión impulsan otra turbina de gas.

Una importante y atractiva propuesta de nuevo equipamiento nos la ofrece el sistema de ciclo integrado de gasificación del carbón (CIGC), en fase de prueba en distintas partes del mundo. La principal innovación que comporta esta técnica es la transformación del carbón en un gas de síntesis, una mezcla de H_2 y CO con cantidades pequeñas de CH_4, CO_2 y ácido sulfhídrico (H_2S). Hasta un 99 por ciento del H_2S se elimina en procesos comercialmente disponibles antes de que el gas sea quemado.

El gas de síntesis alimenta un ciclo combinado parecido al descrito anteriormente. En los modelos habituales, los gases calientes se queman en la cámara de combustión e impulsan la turbina de gas. Luego, los gases resultantes de la turbina generan vapor capaz de mover la turbina de vapor. El rendimiento de este sistema es si-



5. UNA TECNOLOGIA AVANZADA para generar electricidad: la CIGC. Convierte el carbón en una mezcla gaseosa (*amarillo*), por reacción con el vapor de agua y oxígeno, antes de quemarse; así, el sistema ejecuta lo que se llama un ciclo combinado. La energía de los gases calientes mueve la turbina a gas; el calor de los gases se invierte en vaporizar el agua (*azul*), que hace funcionar la turbina de vapor. Estos ciclos combinados ofrecen un rendimiento mayor que los ciclos de vapor convencionales, porque permiten extraer más energía por unidad de carbón quemado. En las centrales eléctricas tradicionales, el carbón se quema directamente en una caldera para hacer funcionar la turbina a vapor. Los gases producidos durante la combustión no se aprovechan, sino que se liberan a través de una chimenea o bien se canalizan hacia procesos de lavado y eliminación del azufre.

milar al de la cámara de combustión de lecho fluidizado a presión, alrededor del 42 por ciento.

Gracias a su gran flexibilidad, los sistemas de gasificación del carbón adquieren especial importancia de cara al futuro de este combustible como fuente de energía. El carbón gasificado, además de su utilización en turbinas de ciclo combinado de gas y de vapor, puede servir también para la cogeneración, es decir, de fuente de calor. Por otra parte, el gas puede convertirse en sustituto del gas natural y en fuente de hidrógeno para el funcionamiento de pilas de combustible.

Merced a su alto rendimiento, estas nuevas técnicas ayudan a limitar las emisiones de CO_2 a la atmósfera. La limitación reviste mayor interés si tenemos en cuenta que las emisiones de CO_2 generadas por el hombre, principalmente a partir de combustibles fósiles y de la quema de bosques, deberían descender de un 50 a un 80 por ciento para evitar un cambio climático significativo.

Tal reducción en las emisiones de CO_2 no podrá alcanzarse probablemente sin un cambio sustancial de los combustibles fósiles hacia otras fuentes de energía alternativas. Pero las emisiones pueden moderarse mediante la aplicación de tres estrategias: aprovechando mejor los combustibles, sustituyendo el carbón por gas natural y reteniendo las emisiones de CO_2. Mejorar el rendimiento de los combustibles fósiles se convierte en la estrategia del máximo relieve, por el extraordinario atractivo económico y ecológico que encierra y por ser aplicable en todos los usos y en todas las naciones.

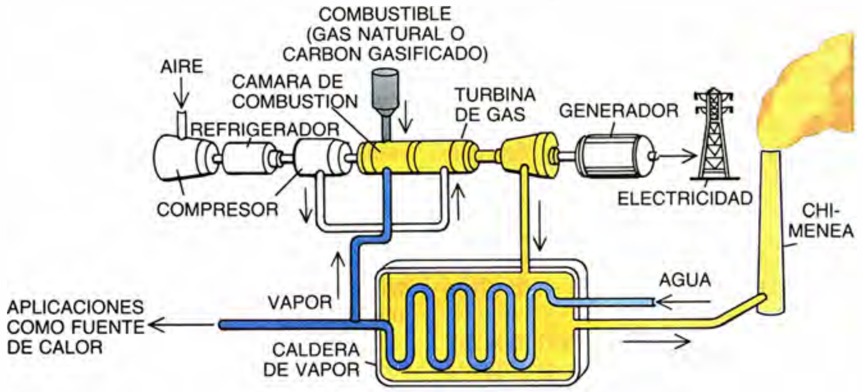
La opción del gas natural complementa la mejora de la eficacia y resulta también atractiva por varias razones. Comparada con la del carbón, la combustión del gas natural, compuesto principalmente por metano, proporciona un 70 por ciento más de energía por cada unidad de CO_2 producida. Además, el gas natural puede quemarse sin derroche gracias a la sobriedad del equipamiento necesario para manipularlo; no produce cenizas y contiene, normalmente, mucho menos azufre que el carbón, por lo que no son necesarias las etapas de lavado. Por otro lado, se están desarrollando métodos avanzados de producción de energía, algunos de los cuales son el resultado de la técnica del motor a reacción, adaptados al gas natural.

En uno de estos sistemas, conocido como TGIV (turbina de gas inyectado por vapor), el gas natural o el gas de síntesis del carbón se queman para impulsar la turbina de gas y producir electricidad. Los gases generados en la turbina se canalizan hacia la caldera para producir vapor, que no moverá una segunda turbina (como en los ciclos combinados), sino que se inyecta en la cámara de combustión. Tal inyección de vapor aumenta la producción de energía y su mejor aprovechamiento, al par que se reducen las emisiones de NO_x.

Aumentará el rendimiento si el aire de combustión, que debe ser comprimido, se refrigera entre los estados de compresión, y si se canaliza un poco de aire hacia las paletas de la turbina. El rendimiento se manifiesta en que se precisa menos potencia para comprimir el aire frío. Además, el aire canalizado rebaja la temperatura de las paletas capacitándolas para resistir temperaturas del gas más elevadas. El breve tamaño de estos sistemas TGIV refrigerados facilita su adaptación, lo mismo a las aplicaciones industriales que a las domésticas.

Se ha propuesto una modificación del TGIV que redundaría en una mejora de rendimiento superior al 52 por ciento. Implica una reacción catalítica antes de la combustión del vapor con el gas natural para dar H_2 y CO. Así, después de la reacción, la energía química de los productos sería mucho mayor que la del propio reactivo (el gas natural).

A pesar del progreso que registran



6. EL SISTEMA TGIV se adapta muy bien al gas natural. Igual que otros sistemas que funcionan con ciclos combinados, consta de una turbina a gas y captura calor desde ésta para producir vapor de agua. El vapor se canaliza hacia la cámara de combustión, aumentando la producción energética y el rendimiento. Al mismo tiempo, el aire de combustión se enfría durante la compresión, haciendo el proceso más fácil y reduciendo la energía necesaria para que funcione el sistema. La bifurcación del aire desde la unidad del compresor hasta la turbina ayuda a refrigerar y, por tanto, la capacita para soportar las temperaturas más altas del gas. (Ilustración realizada por Ian Worpole.)

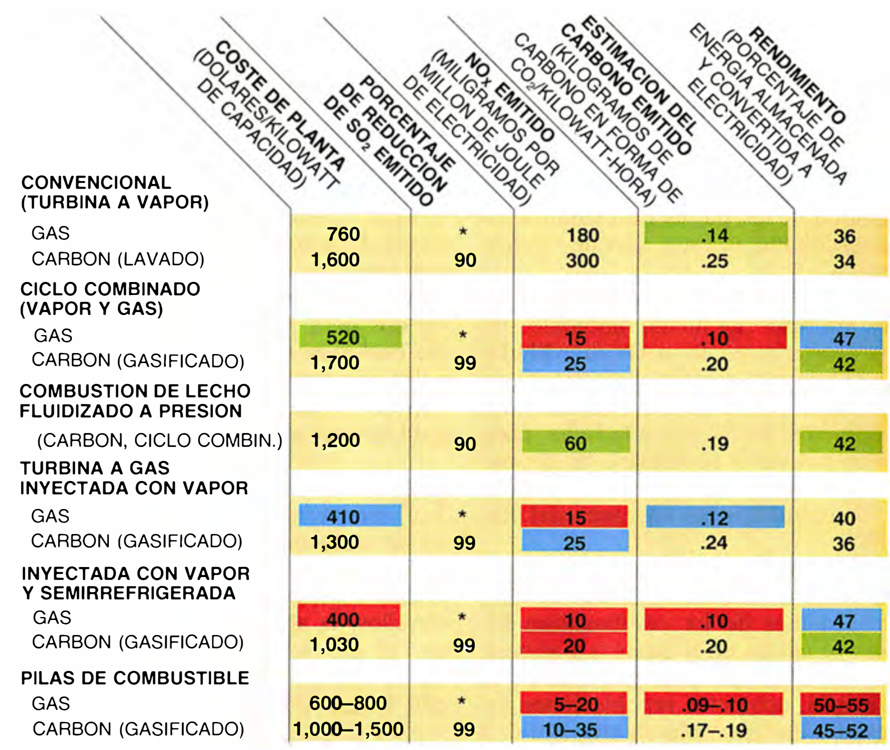
las técnicas para un mayor aprovechamiento del gas natural, existen limitaciones significativas en el proceso de sustitución de carbón por gas. En primer lugar, el gas natural es mucho menos abundante. Según estimaciones, al ritmo actual de consumo y con la tecnología existente, los recursos recuperables de carbón durarían unos 1500 años. En cambio, las reservas de gas natural se agotarían en sólo 120 años (o quizás dos o tres veces más, si se imponen los elevados costes de recuperación del gas de las fuentes no convencionales o si se desarrollan métodos más económicos para recuperar las reservas menos accesibles). Si el gas natural substituyera al carbón en todas sus aplicaciones, las reservas de gas no durarían más de 55 años.

En segundo lugar, los escapes de gas natural durante la extracción y el transporte podrían, al menos parcialmente, contrarrestar las ventajas de su uso, porque el CH_4 es un gas de invernadero que absorbe mejor la radiación infrarroja que el CO_2, aunque su tiempo de residencia en la atmósfera sea mucho más corto.

El problema de las fugas debería tener una solución técnica. Pero, ¿qué puede hacerse con el del suministro? La preocupación disminuye cuando se recuerda que el gas es indispensable solamente hasta que sean competitivas las energías alternativas a los combustibles fósiles.

La distribución desigual de las fuentes de gas natural agrava las dificultades. Si en EE.UU. el gas natural reemplazara al carbón en todos sus usos, los suministros durarían sólo unos 18 años, mientras que en la Unión Soviética habría gas para 70 u 80 años. Esta distribución irregular aumenta la preocupación sobre el acceso al mismo. Desde el punto de vista técnico, ese problema parece salvable. Aun cuando la mayor parte de gas natural la consumen los países productores, su comercio ha crecido desde principios de los años setenta, y se espera que la tendencia continúe, en parte porque el Banco Mundial y otros entes económicos están fomentando la búsqueda de gas natural y la construcción de infraestructuras de distribución en el Tercer Mundo.

Existe la creencia general de que se encontrará mucho más gas cuando su exploración ofrezca la misma rentabilidad que la del petróleo. El comercio mundial a través de gaseoductos cubre hoy un 11 por ciento del consumo total, mientras que el transporte por barcos del gas licuado (PGL) es sólo de un 3 por ciento. El crecimiento potencial de una red comercial global se hace evidente a quien eche una mirada a las piezas que están en juego. La red más extensa del mundo es la que distribuye el gas natural en EE.UU., que conecta con las fuentes de Canadá por gaseoducto y con el norte de Africa por petroleros que transportan el PGL. Existe también un gaseoducto desde México hasta EE.UU. que podría entrar en funcionamiento en cuanto las condiciones del mercado lo urgieran. Hay en estudio proyectos para llevar el gas natural licuado desde cualquier lugar hasta los Estados Unidos.



	COSTE DE PLANTA (DOLARES/KILOWATT DE CAPACIDAD)	PORCENTAJE DE REDUCCION DE SO_2 EMITIDO	NO_x EMITIDO (MILIGRAMOS POR MILLON DE JOULE DE ELECTRICIDAD)	ESTIMACION DEL CARBONO EMITIDO (KILOGRAMOS DE CARBONO EN FORMA DE CO_2/KILOWATT-HORA)	RENDIMIENTO (PORCENTAJE DE ENERGIA ALMACENADA Y CONVERTIDA A ELECTRICIDAD)
CONVENCIONAL (TURBINA A VAPOR)					
GAS	760	*	180	.14	36
CARBON (LAVADO)	1,600	90	300	.25	34
CICLO COMBINADO (VAPOR Y GAS)					
GAS	520	*	15	.10	47
CARBON (GASIFICADO)	1,700	99	25	.20	42
COMBUSTION DE LECHO FLUIDIZADO A PRESION					
(CARBON, CICLO COMBIN.)	1,200	90	60	.19	42
TURBINA A GAS INYECTADA CON VAPOR					
GAS	410	*	15	.12	40
CARBON (GASIFICADO)	1,300	99	25	.24	36
INYECTADA CON VAPOR Y SEMIRREFRIGERADA					
GAS	400	*	10	.10	47
CARBON (GASIFICADO)	1,030	99	20	.20	42
PILAS DE COMBUSTIBLE					
GAS	600–800	*	5–20	.09–.10	50–55
CARBON (GASIFICADO)	1,000–1,500	99	10–35	.17–.19	45–52

* INDICA SOLAMENTE LAS EMISIONES TRAZA DE SO_2

7. COMPARACION ENTRE TECNICAS AVANZADAS de combustibles fósiles. El cotejo revela que, por lo general, los sistemas basados en gas son más baratos de instalar, emiten menos dióxido de azufre (SO_2) y menos CO_2, amén de resultar más rentables que los fundados en carbón (aunque los costes de combustible pueden ser mayores). Los colores rojo, azul y verde, corresponden, por este orden, a los mejores números de la columna. Todos los valores, excepto los de una central de vapor convencional, son optimistas, aunque alcanzables. Los de un sistema tradicional reflejan valores medios de las centrales existentes. Las eficacias fueron calculadas sobre un valor base de calentamiento elevado, según las normas federales de regulación por las que se rigen los Estados Unidos.

En Europa existe una red bien desarrollada que recibe los suministros de los Países Bajos, Noruega, norte de Africa y la Unión Soviética. La red podría mejorarse en el futuro, ya que Irán proyecta construir nuevos gaseoductos que podrían ser utilizados por la Unión Soviética. A cambio del gas iraní, la URSS suministraría su propio gas a Europa. La Unión Soviética está negociando con Japón la posibilidad de construir un gaseoducto de 5000 kilómetros, con tendido en parte submarino, entre Siberia y Japón a través de Corea del norte y del sur. Con el tiempo, la URSS podría suministrar también gas a China.

Japón ha realizado, a su vez, un considerable esfuerzo para asegurarse el suministro de gas natural. Importa el gas licuado desde Indonesia, Malasia, Australia, Alaska y Oriente Medio. Irán está promocionando un proyecto de 12.000 millones de dólares para llevar el gas a la India y Pakistán, a través de un gaseoducto de 3200 kilómetros, de Bandar Abbas a Calcuta.

Pero que las naciones del mundo deseen pasar del carbón al gas natural es harina de otro costal. De momento, el gas es mucho más caro que el carbón y puede llegar a serlo todavía más, si aumenta la demanda. De llevarse a cabo el cambio, los EE.UU. y otros países con abundantes yacimientos de carbón y escasos suministros de gas podrían mostrarse reticentes a reforzar su dependencia de fuentes externas de combustibles fósiles. Después de todo, cada nación está preocupada por la seguridad y la estabilidad de las fuentes de energía que usa.

Por otra parte, el aumento de consumo de gas natural resulta viable para los países del este y oeste de Europa. Si la Unión Soviética se convierte en el principal suministrador de

gas en esa zona, la economía soviética se verá notablemente fortalecida y se reducirán la emisión de CO_2 y la contaminación. Ayudar a la URSS con técnicas avanzadas de producción, transporte y utilización de gas podría ser una política estabilizadora que adoptaran los países industrializados de occidente en estos días de "perestroika".

De manera similar, y pensando en los intereses del medio ambiente, sería acertado ayudar a Oriente Medio en el fomento de sus exportaciones de gas natural, no sólo a Europa, sino también al Pakistán y a la India; también, apoyar el suministro de gas natural por parte de Indonesia, Malasia y Thailandia a las naciones del Pacífico.

Una tercera estrategia, más futurista, para reducir las emisiones de CO_2 procedentes de los combustibles fósiles se centra en la captura y secuestro de las emisiones. Se podría, por ejemplo, acometer repoblaciones forestales que absorbieran una cantidad de gas equivalente a la emitida. Mas, para compensar las emisiones de una sola central eléctrica de carbón de 500 megawatt (prototipo habitual), operando con una eficacia del 34 por ciento, se necesitaría un bosque de unos 2500 kilómetros cuadrados. Para secuestrar todo el carbón emitido en forma de CO_2 por los combustibles fósiles en los EE.UU. en 1988 −1400 millones de toneladas métricas− se requerirían dos millones y medio de kilómetros cuadrados de bosque, aproximadamente el 25 por ciento de la superficie del país. Y hay que tener en cuenta que un plan de repoblación forestal debería incluir medios para proteger los plantones. De cualquier modo, los costes de repoblación forestal están muy por debajo de los de cualquier otro método para retener el CO_2.

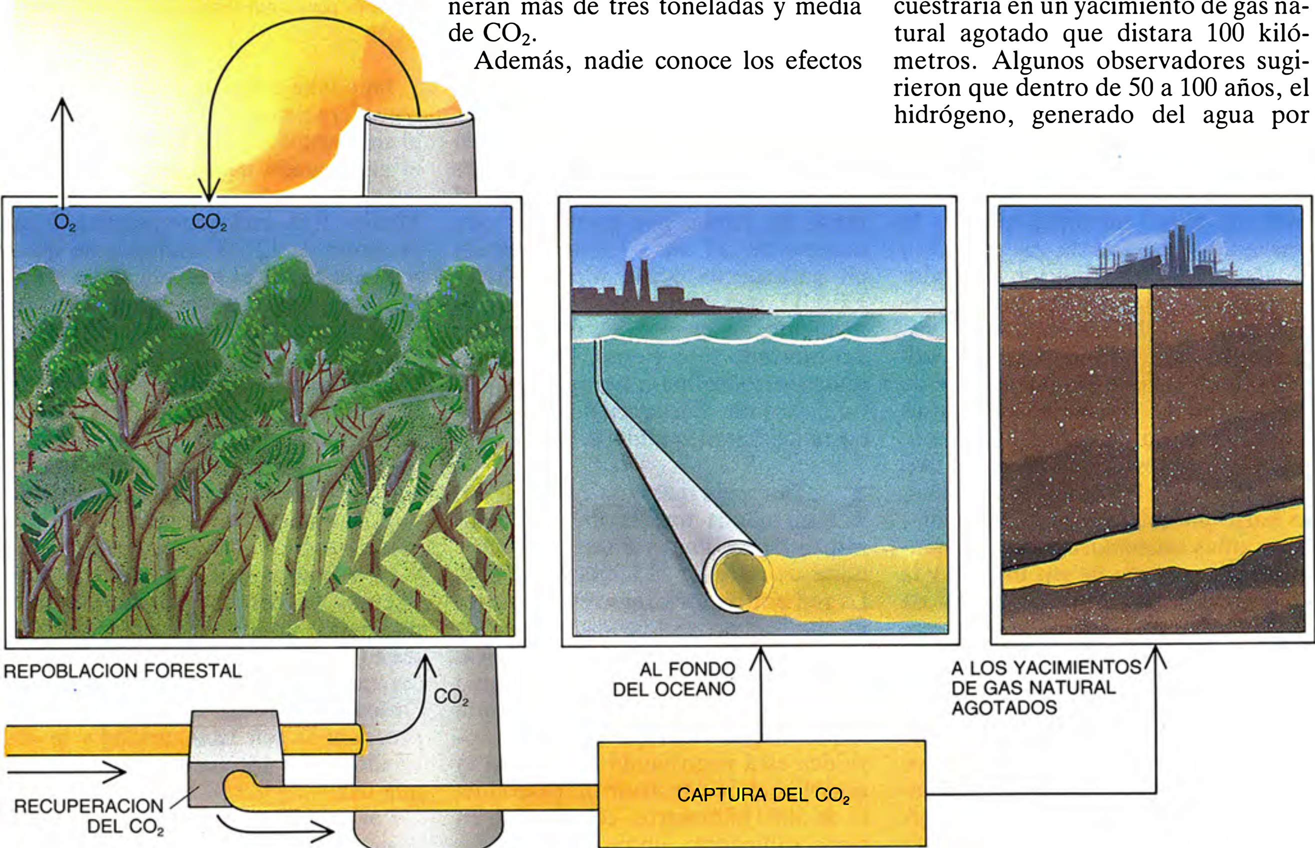
Otra vía alternativa consistiría en recuperar el CO_2 directamente de las emisiones de las grandes centrales y almacenarlo. La recuperación podría hacerse por varios medios, entre ellos, la absorción química. Luego, el gas se comprimiría para su transporte y almacenamiento en algún lugar. Formas de almacenarlo son canalizarlo hasta las profundidades del océano o introducirlo en los yacimientos agotados de gas natural.

Se trata, a buen seguro, de opciones carísimas, al menos según los criterios actuales. El principal problema radica en la cuantía desmesurada de las emisiones: por cada tonelada de carbono de combustible fósil se generan más de tres toneladas y media de CO_2.

Además, nadie conoce los efectos que este almacenamiento provocaría en la ecología de los océanos o cuánto tiempo permanecería el CO_2 en el fondo del mar o en los yacimientos de gas. Por no decir que hasta dentro de 20 o 30 años no podremos contar con tales depósitos agotados, y se tardaría otro tanto en rellenarlos. A todo ello agréguese que la recuperación de las emisiones de CO_2 sería viable en el caso exclusivo de fuentes estacionarias y abundantes de CO_2, que, en los EE.UU., sólo dan cuenta del 30 o 40 por ciento de las emisiones totales.

Sin embargo, merece la pena considerar esta posibilidad debido a las implicaciones ambientales del uso de combustibles fósiles. Aunque los primeros análisis sugirieron que la captura y almacenamiento del CO_2 doblaría el coste actual de la electricidad, unos cálculos más recientes, elaborados por Chris A. Hendriks, Kornelis Blok y Wim C. Turkenburg, de la Universidad de Utrecht, rebajan bastante la cifra. El equipo sugirió que el coste de la electricidad no aumentaría más del 30 por ciento y resultaría, pues, viable.

El grupo de Utrecht suponía que el gasificador de oxígeno haría máxima la producción de H_2 y que éste serviría de combustible del ciclo combinado. El CO_2 formado durante la producción de H_2 se compactaría y secuestraría en un yacimiento de gas natural agotado que distara 100 kilómetros. Algunos observadores sugirieron que dentro de 50 a 100 años, el hidrógeno, generado del agua por



8. ESQUEMAS para controlar las emisiones de dióxido de carbono, incluida la repoblación forestal con el fin de absorber ese gas de la atmósfera (*izquierda*). En opción alternativa, el dióxido de carbono puede capturarse antes de que alcance el aire y, posteriormente, canalizarse hacia las profundidades del océano (*centro*) o hacia las formaciones geológicas naturales, como los yacimientos vaciados de gas natural (*esquema de la derecha*).

energía solar o por energía de fisión o fusión, se convertirá en una de las energías menos contaminantes. Teniendo presente esta posibilidad, Robert H. Willian, de la Universidad de Princeton, ha apuntado que la producción de H_2 a partir del carbón gasificado puede ser una forma fácil de empezar la transición general hacia el uso del hidrógeno como fuente de energía. El H_2 podría producirse cerca de las minas de carbón y canalizarse hasta los centros de consumo. Una vez aquí, impulsaría muy eficazmente las turbinas de gas o las pilas de combustible. Paralelamente, el CO_2 producido con el H_2 se conduciría a lugares donde permanecería secuestrado.

Las pilas de combustible operan como una batería, salvo en la reposición constante del combustible. En la pila de ácido fosfórico (la única en uso), el H_2 se encuentra primero con el ánodo permeable y se oxida (se eliminan electrones), dando iones hidrógeno positivos (H^+) y electrones libres. Luego, los electrones fluyen en un circuito externo proporcionando energía. Mientras tanto, los iones hidrógeno migran a través del ácido fosfórico. Los electrones y los iones convergen otra vez en el cátodo y reaccionan con el O_2 para formar vapor, que puede aprovecharse para calentar o desecharse.

Para producir la electricidad que necesita un hogar, una serie de pilas de combustible constituirían la unidad de generación de energía. Hasta ahora, se están estudiando al menos tres tipos de pilas, aparte de la de ácido fosfórico. Estos dispositivos pueden operar con un grado muy elevado de eficacia, del 50 al 60 por ciento, suponiendo que el calor producido se aprovechara.

Hay muchas cabezas poderosas que buscan solución al problema dual de mejorar la generación de energía procedente de los combustibles fósiles y sustituirlo por opciones que dañen menos al medio ambiente. Pero quedan muchos cabos sueltos. Por ejemplo, la inercia de los sistemas de energía mundial al cambio, ya que es demasiado costoso abandonar unos equipos sin haberlos amortizado. Por eso, aun cuando todo el mundo estuviera convencido de la necesidad de reducir los gases de invernadero tardará décadas convertirlo en realidad.

El problema de la inercia guarda relación con otro. Si el efecto de invernadero impusiera una obligación repentina en la reducción de las emisiones de CO_2, los costes serían altísimos, no sólo porque las inversiones en los equipos originales no se amor-

PROCESO DE ELIMINACION	PORCENTAJE DE CO_2 ELIMINADO	COSTE (CIENTOS POR LIBRA DE CARBONO EN FORMA DE CO_2) ELIMINACION	CAPTURA	PORCENTAJE DE REDUCCION EN EL RENDIMIENTO	COSTE DE LA ELECTRICIDAD RELATIVA AL COSTE ACTUAL
TAMICES MOLECULARES	90	8.4	1.1 *	80	5.0
ADSORCION SOBRE PIEDRA CALIZA	90	5.9	1.1 *	59	2.4
LAVADO CON MEA	90	5.5	1.1 *	57	2.3
COMBUSTION CON OXIGENO	100	7.0	1.1 *	30	1.8
IGCC/ SELEXOL	88	1.8	.7 **	13	1.3
REPOBLACION FORESTAL	100	0	.9	0	1.1

* EN EL OCEANO PROFUNDO

** EN LOS YACIMIENTOS DE GAS NATURAL AGOTADOS

9. COSTES ESTIMADOS de los métodos propuestos de captura y secuestro de CO_2 en las centrales eléctricas de carbón; varían grandemente. Creíase en un comienzo, que los costes serían prohibitivos, pero un estudio reciente ha bajado la estimación de manera significativa. Tal estudio supone que el CO_2 se recupera desde el carbón gasificado (en un sistema CIGC) mediante un absorbente llamado selexol. Los tamices moleculares son materiales porosos y permeables para ciertos gases sólo; MEA es el producto químico monoetanolamina. Estos materiales pueden capturar física o químicamente al CO_2 desde los gases residuales de una planta tradicional. La combustión de oxígeno significa que éste reemplaza al aire en la caldera; el proceso facilita la recuperación de CO_2 porque se encuentra a elevada concentración en los gases residuales. La repoblación forestal puede ser la opción más barata, pero las grandes extensiones de tierra que se requieren hacen inviable esta opción.

tizarían, sino también porque las tecnologías no fósiles desarrolladas hasta hoy resultan todavía muy caras y limitadas en el suministro. Además, los costes estarían desigualmente distribuidos y serían más costosos para los países en vías de desarrollo, porque, amén de ser más pobres, su demanda energética crece rápidamente.

Algunos modelos de ordenador sugieren que una emisión global de 1600 a 3500 millones de toneladas métricas de carbono, en forma de CO_2, por año provocaría un índice de calentamiento aceptable —en el orden de 0,05 grados por década—, suponiendo que los demás gases de invernadero contribuyeran sólo en otros 0,05 grados. Si esta valoración es correcta, cabe preguntarse quién va a utilizar qué y si el racionamiento favorecerá los usos privados.

Los países industrializados, con apenas un tercio de la población mundial, generan el 80 por ciento de los gases de invernadero. Los países pobres, por contra, presentan un consumo de energía por persona muy inferior a los primeros. ¿Acaso las naciones industrializadas amortiguarán su ritmo de consumo para que las naciones en vías de desarrollo aceleren el suyo y consigan así un mayor crecimiento económico?

Las necesidades de los países en vías de desarrollo plantean una cuestión más. La mera extrapolación de los consumos energéticos en el último decenio nos lleva a la conclusión de que las emisiones de CO_2 de los países en vías de desarrollo (incluida China) podrían exceder a las de los países industrializados durante la próxima década. Algunos sostienen que la instalación de técnicas ahorrativas les permitiría a los países en vías de desarrollo alcanzar un nivel de riqueza equivalente al de occidente de mediados de los setenta, con un índice de consumo energético por persona de aproximadamente un tercio de la media actual europea. Para hacerlo posible, los países atrasados tendrían que mostrar voluntad de invertir ahora para ahorrar más tarde. Pero las dificultades de conseguir capital estimulan, por contra, la compra de equipos más baratos y también más derrochadores de energía.

Muchas de estas cuestiones carecen de una solución clara. Podemos, sin embargo, hacer algunas recomendaciones para un futuro inmediato. Parece prudente gestionar los combustibles fósiles considerando probable el calentamiento de la Tierra por efecto de invernadero. Tal compromiso implica adoptar técnicas más eficientes, lo que parece razonable desde un punto de vista económico.

También tiene sentido sustituir el carbón por el gas natural allí donde se pueda. Aunque el consumo de gas natural en lugar de carbón pudiera subir los precios del gas natural y acelerar la reducción de reservas, podría también concedernos tiempo, proporcionando al ambiente cierta protección hasta que maduren las técnicas que exige la explotación de fuentes de energía no fósiles. Recuérdese, por otro lado, que los precios del petróleo cayeron en los años cincuenta y sesenta a pesar del crecimiento de la demanda. El suministro internacional de gas natural puede crecer sin aumento consiguiente del precio, siempre que se exploten los recursos de la Unión Soviética y de Oriente Medio. A las naciones industrializadas de occidente corresponde aportar la asistencia técnica y el capital necesarios para que los países en vías de desarrollo y el este de Europa aprovechen sus recursos de gas natural y adopten las técnicas precisas para sacarle mayor partido al consumo de la energía.

Paralelamente, debería incidirse más en la investigación sobre el ciclo global del carbono, para darle mayor rigor científico a las regulaciones de emisiones de los gases de invernadero. Debe fomentarse la búsqueda y perfeccionamiento de técnicas ahorradoras aplicables a los combustibles fósiles (turbinas de gas y pilas de combustible), la investigación de métodos para producir H_2 a partir del carbón y recuperar y secuestrar el CO_2 (a bajo coste y con las mínimas consecuencias ambientales), y el aprovechamiento de fuentes de energía no fósiles que sean eficaces, seguras y económicas.

Mientras la investigación no avance más en ese camino, será difícil que el mundo pierda su adicción a los combustibles fósiles. Con todos sus defectos, continúan siendo los más baratos, accesibles y fáciles de adaptar a todo tipo de aplicaciones, grandes y pequeñas, simples y complejas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ENERGY TECHNOLOGY R&D: WHAT COULD MAKE A DIFFERENCE? William Fulkerson et al. Synthesis Report, Part 1, ORNL-6541/V1. Oak Ridge National Laboratory, mayo de 1989.

THE POTENTIAL EFFECTS OF GLOBAL CLIMATE CHANGE ON THE UNITED STATES. Dirigido por Joel B. Smith y Dennis Tirpak. EPA-230-05-89-050, Report to Congress, diciembre de 1989.

NATIONAL ENERGY STRATEGY, INTERIM REPORT. U.S. Department of Energy, DOE/S-0066P, abril de 1990.

TECHNOLOGY AND COST OF RECOVERY AND STORAGE OF CARBON DIOXIDE FROM AN INTEGRATED GASIFIER COMBINED CYCLE PLANT. Chris A. Hendriks, Kornelis Blok y Wim C. Turkenburg en *Applied Energy* (en prensa).



Energía nuclear

Sólo podremos sacar partido del inmenso potencial de la energía nuclear si la seguridad, los residuos radiactivos y la proliferación de armas nucleares son controlados por una institución internacional

Wolf Häfele

La energía nuclear ha sido, a un tiempo, ensalzada como la panacea de los problemas energéticos del mundo y condenada como el método más peligroso e inadecuado de producir energía. Hoy, a raíz de los accidentes de Chernobyl y Three Mile Island, la oposición popular se ha endurecido. La construcción de centrales se ha paralizado en muchos países. En Estados Unidos no se ha encargado ninguna desde el año 1978. En Suecia un referéndum ha pedido el final de la energía nuclear para el año 2010. En Suiza y Alemania existe una moratoria tácita. Y, en la Unión Soviética, el debate sobre el futuro de ese recurso se ha intensificado.

La clave del algunas veces agrio debate sobre la energía nuclear se encuentra en la solución del dilema derivado de dos características físicas opuestas. Por un lado, la nuclear puede proporcionar un billón de veces más energía que cualquier otra fuente, como el viento o el agua, y un millón de veces más que cualquier reacción química (principalmente de combustión y electroquímica), que, con la revolución industrial, transformaron la sociedad. Los actuales niveles de producción de energía nuclear no alcanzan este potencial (al que me referiré como el factor billón).

Por otro lado, la producción de energía, de origen químico o nuclear, genera residuos. Tal como ha señalado John P. Holdren, de la Universidad de California en Berkeley, las energías complementarias, así el viento y el agua, no transforman las moléculas que intervienen y, desde este punto de vista, su utilización es ecológicamente sana. Por el contrario, las reacciones químicas y atómicas transforman las moléculas y los núcleos, respectivamente, creando residuos. Los partidarios del uso de las energías complementarias han de buscar soluciones para hacer frente a las limitaciones de la cantidad, pequeña en comparación, de energía producida por esas fuentes. Y los que abogan por la energía nuclear y química han de ser conscientes del problema de los residuos, radiactivos y atmosféricos, que se generan.

1. CENTRAL NUCLEAR de Leibstadt (Suiza). Entró en servicio en 1984. El reactor de agua en ebullición es una versión del reactor de agua ligera; en él, el calor procedente del proceso de fisión se aprovecha para mover las turbinas.

La energía nuclear merece, sin duda, una valoración crítica. Las proyecciones de futuro encuentran grandes dificultades para satisfacer las necesidades energéticas y las exigencias de conservación del medio ambiente sin recurrir a la energía nuclear. Al mismo tiempo, un mayor protagonismo de ésta en los planes energéticos parece inconcebible, dado el actual clima político de oposición.

Esta aporía podría resolverse si se establecieran instituciones y se dictaran normas de alcance mundial. En esas organizaciones internacionales cristalizaría una propuesta realizada, en 1946, por el Secretario de Estado norteamericano Dean G. Acheson y por los miembros de la Comisión de Energía Atómica de las Naciones Unidas David E. Lilienthal y Bernard M. Baruch, que pedía la creación de una organización mundial que regulara la energía atómica. Esta organización, adaptada a las circunstancias del año 2000, podría garantizar la seguridad de los reactores y poner en servicio y controlar los depósitos de residuos. La energía nuclear debe considerarse en el marco de un sistema global energético que permita compatibilizar su uso para la actividad humana con la protección del entorno.

Antes de analizar el futuro, debemos examinar la situación actual de la energía nuclear. En 1989, este recurso proporcionó el 16 por ciento de la producción mundial de electricidad. De acuerdo con los datos de la Organización Internacional para la Energía Atómica (IAEA), a finales de ese año había conectados a la red eléctrica 426 reactores nucleares con una potencia total de 318.271 megawatt (MW). (Con una potencia de 1 gigawatt —equivalente a 1000 MW— se puede abastecer de energía eléctrica a unas 500.000 viviendas.) Cuando entren en funcionamiento otros 96 reactores que están en construcción, la capacidad generadora de energía nuclear ascenderá a 397.178 MW, es decir, casi 400 GW.

En 1989, se conectaron a la red 12 reactores, con una potencia total de 10.407 MW y, en 1990, está previsto que se conecten otros 15, con una potencia total de 12.151 MW. Aunque muchos europeos y americanos creen que la energía nuclear está en un punto muerto, en 1989 se inició la construcción de cinco nuevos reactores, con una potencia total de 4738 MW: dos en Japón, dos en Corea del Sur y uno en la Unión Soviética.

Examinemos qué sucedería si la capacidad de generación de electricidad por medio de la fisión nuclear se mantuviera constante, en 400 GW, en los próximos 100 años. Es decir, si no se añadiera ninguna nueva central a las

WOLF HÄFELE ha sido director general del Centro de Investigación Jülich (Alemania) y director adjunto del Instituto Internacional de Análisis Aplicado de Sistemas, en Laxenburg (Austria). Comenzó sus estudios de física en la Universidad Técnica de Munich, que prosiguió en el Instituto Max Planck; se doctoró por la Universidad de Göttingen, en 1955.

	REACTORES EN FUNCIONAMIENTO	POTENCIA INSTALADA (MW)	PORCENTAJE SOBRE LA POTENCIA TOTAL INSTALADA	REACTORES EN CONSTRUCCION
AMERICA DEL NORTE Y CENTRAL				
Canadá	18	12,185	15.6	4
Cuba	0	0	0	2
México	1	654	—	1
EE.UU.	110	98,331	19.1	4
AMERICA DEL SUR				
Argentina	2	935	11.4	1
Brasil	1	626	.7	1
EUROPA				
Bélgica	7	5,500	60.8	0
Bulgaria	5	2,585	32.9	2
Checoslovaquia	8	3,264	27.6	8
Ex-Alemania oriental	6	2,102	10.9	5
Finlandia	4	2,310	35.4	0
Francia	55	52,588	74.6	9
Hungria	4	1,645	49.8	0
Italia	2	1,120	—	0
Holanda	2	508	5.4	0
Rumanía	0	0	0	5
España	10	7,544	38.4	0
Suecia	12	9,817	45.1	0
Suiza	5	2,952	41.6	0
Gran Bretaña	39	11,242	21.7	1
Ex-Alemania occidental	24	22,716	34.3	1
Yugoslavia	1	632	5.9	0
ASIA				
China	0	0	0	3
India	7	1,374	1.6	7
Irán	0	0	0	2
Japón	39	29,300	27.8	12
Pakistán	1	125	.2	0
Corea del Sur	9	7,220	50.2	2
Taiwan	6	4,924	35.2	0
URSS	46	34,230	12.3	26
AFRICA				
Africa del Sur	2	1,842	7.4	0
TOTAL	426	318,271	—	96

Fuente: Oficina internacional para la energía atómica, Viena

2. POTENCIA NUCLEAR que produce cada país, expresada en megawatt de electricidad, junto con el porcentaje que supone de la energía eléctrica total. En la columna de la derecha se consignan los reactores nucleares que se hallaban en fase de construcción al 31 de diciembre de 1989.

actualmente en funcionamiento y en construcción. Para producir 1 gigawatt-año en un reactor de agua ligera (RAL) —así denominados porque utilizan agua corriente como refrigerante, que es convertida en vapor por el calor producido con la fisión— se necesitan, con la tecnología actual, unas 30 toneladas de uranio-235, enriquecido al 3 por ciento. Las tres cuartas partes de los reactores actuales son de tipo RAL. (El uranio-235, que se encuentra en una pequeña proporción en el uranio natural, en su mayoría uranio-238, se concentra, o enriquece, hasta alcanzar la masa crítica —condición necesaria para que pueda iniciarse la fisión en cadena— en el reactor.)

En el razonable supuesto que se consiga una mejora del 15 por ciento en el rendimiento del núcleo del reactor —es decir, que los elementos combustibles tengan un tiempo de vida más largo— sólo se necesitarían 20 toneladas de uranio enriquecido al año o, lo que es lo mismo, 160 toneladas de uranio natural, sin enriquecer. Por tanto, si las estimaciones conservadoras son correctas, para cubrir la demanda de uranio de los próximos 100 años, se precisarán de 6 a 7 millones de toneladas, cifra equivalente a las reservas mundiales de uranio estimadas.

Ahora bien, tales estimaciones se apoyan en un ciclo de combustible de "un solo paso", en el cual el combustible no se reprocesa para utilizarlo de nuevo y se van acumulando residuos radiactivos. Dado que la cantidad de combustible fresco, o nuevo, empleado en un reactor es igual a la cantidad de combustible gastado que se descarga, la generación de cada gigawatt producirá cada año 20 toneladas de residuos radiactivos (de los cuales, el 94 por ciento será uranio; el 1 por ciento, plutonio, y el 5 por ciento, productos de fisión) totalizando, para los 400 GW, 8000 toneladas anuales. Teniendo en cuenta que los depósitos de residuos nucleares tendrían cada uno una capacidad de unas 70.000 toneladas de elementos pesados —uranio y plutonio principalmente— sería necesario abrir un depósito de esas características cada nueve años, es decir, unos 11 nuevos emplazamientos en los próximos 100 años.

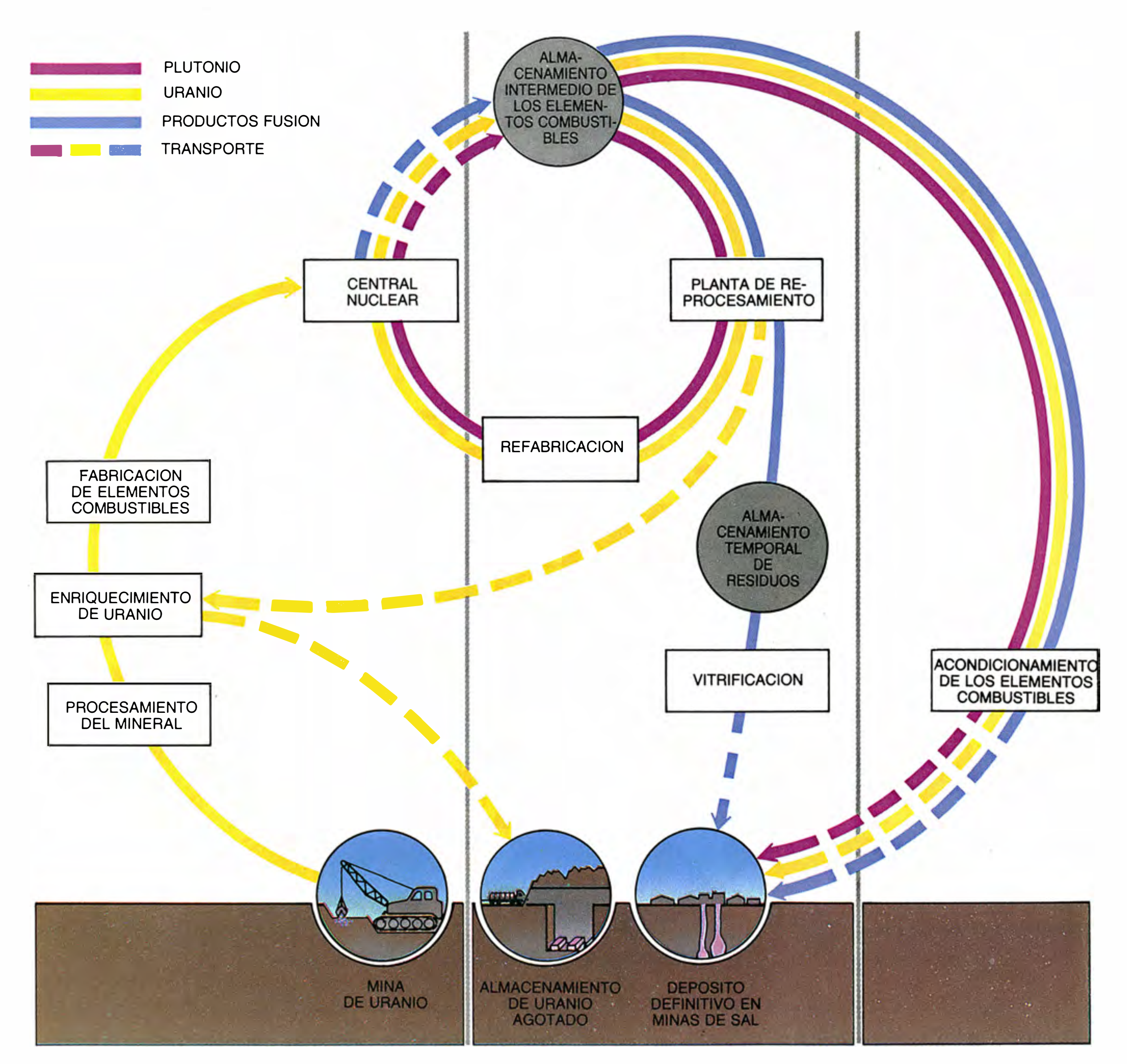
El almacenamiento de residuos radiactivos no presenta mayores complicaciones técnicas, pero la oposición ciudadana a su transporte y depósito plantea problemas legales y sociales. Algunos emplazamientos, así los de Yucca Mountain (Estados Unidos) y Gorleben (Alemania), han sido pospuestos y cancelados ante las fuertes protestas que han originado. No existen, en ningún lugar del mundo, depósitos definitivos.

Los RAL, además de consumir durante el próximo siglo todas las reservas mundiales de uranio y de producir grandes cantidades de residuos, generarían, en proporción, poca energía. A pesar de la cantidad de energía, ingente en comparación con otras fuentes, que se puede obtener de la fisión, la producción de 400 GW equivale sólo a 70 terawatt de energía térmica al año (TW); lejos, por tanto, de las reservas conocidas de petróleo (154 TW) o de gas (130 TW). La razón estriba en que, aun cuando el rendimiento de los RAL mejore en un 15 por ciento, sólo utilizan en la fisión el 0,6 por ciento de los átomos de uranio disponibles y desperdician el 99,4 por ciento restante.

A pesar de ello, el efecto de invernadero ofrece una razón poderosa para incrementar el uso de la energía nuclear, siempre que el problema de la seguridad y el de los residuos se resuelvan satisfactoriamen-

te. Se han realizado varias propuestas para reducir el nivel de emisión de dióxido de carbono (CO_2) y evitar, así, las consecuencias de un incremento en la temperatura del globo. Cada una de ellas otorga un papel diferente a la energía nuclear. La conferencia sobre "Los cambios en la atmósfera y sus implicaciones en la seguridad mundial" celebrada en Toronto, en 1988, aconsejó una reducción del 20 por ciento de las emisiones de CO_2, de 6000 millones de toneladas anuales a 4800 millones, para el año 2005. En la 14ª conferencia mundial de la energía, que tuvo lugar en Montreal en 1989, propuse una ulterior reducción de las emisiones de CO_2 originadas por la producción energética, limitándolas a 4000 millones de toneladas al año para el 2030. Mi propuesta de reducción de CO_2 —denominada Jülich— se basaba en el incremento del ahorro de energía, en la sustitución del carbón por gas natural y en una mayor utilización de la energía solar y la combustión de biomasa. La energía nuclear cubría el resto de la demanda energética.

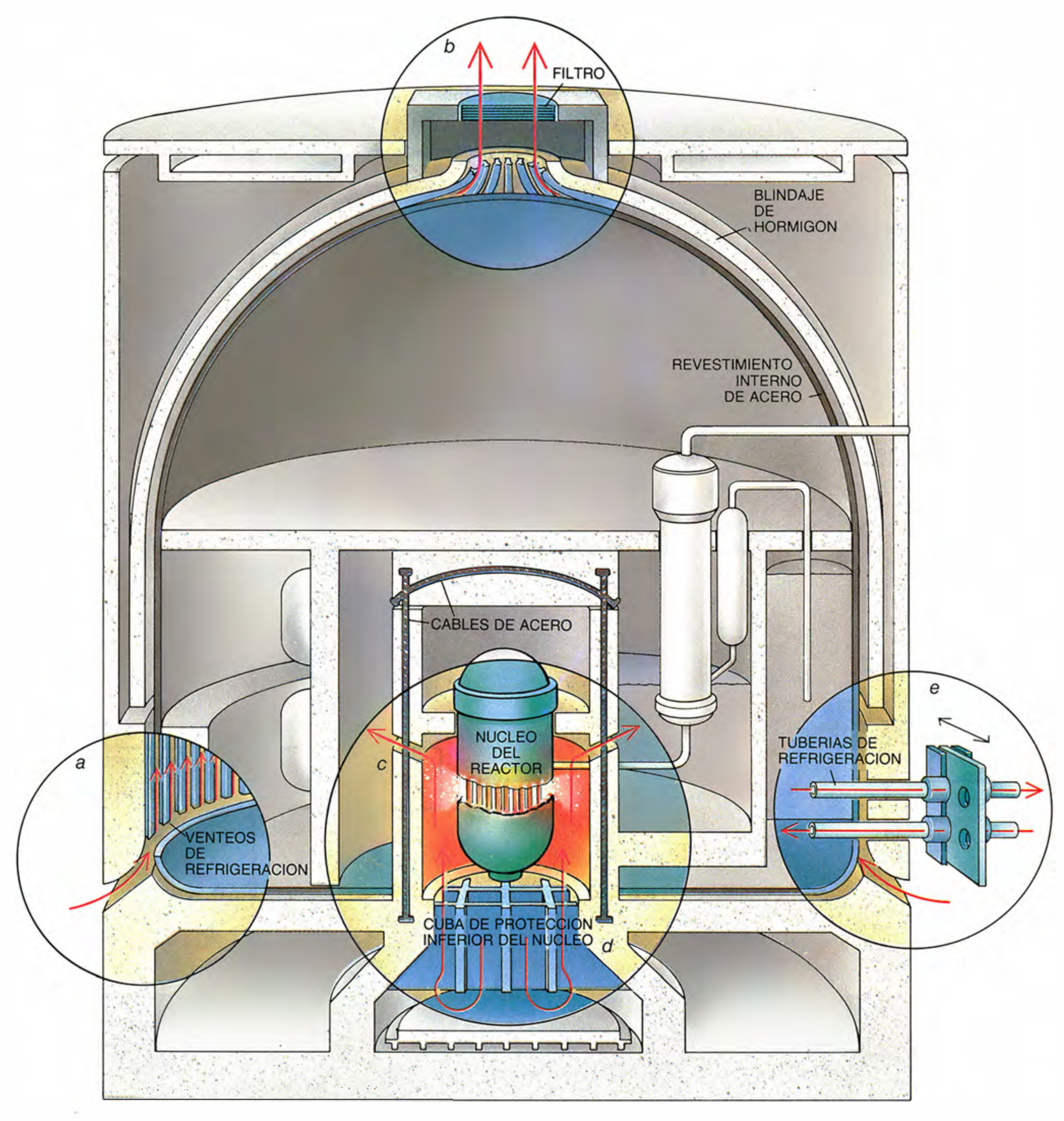
A diferencia de otras propuestas, la Jülich consideraba el costo creciente del ahorro energético. El ahorro no es, hasta cierto punto, una solución controvertida a la escasez energética. Sin embargo, los grandes ahorros de energía requieren, por un lado, inversiones económicas desproporcionadas y, por otro, cambios en la infraestructura existente. Estas inversiones acabarían por provocar que los costes financieros y sociales de la producción de energía fueran menores que los de su ahorro. Por ello, teniendo presente estas limitaciones, estimé que la propuesta de Umberto



3. LLAMASE CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR el proceso industrial que sufre el uranio, principal elemento usado como combustible en la fisión nuclear. El uranio se encuentra en la naturaleza; en la mayoría de los casos, necesita ser enriquecido —proceso en el cual el pequeño porcentaje de uranio fisible es concentrado— antes de usarse de combustible. En un ciclo "de un solo paso", el combustible gastado puede almacenarse en depósitos temporales o definitivos. El combustible gastado puede ser también reprocesado químicamente y utilizado de nuevo después de atravesar un proceso de fabricación. El plutonio, producido durante la fisión, puede ser desechado o reciclado para su utilización como combustible.

P. Colombo, miembro de la Comisión Italiana de Energía Atómica y Energías Alternativas, de un ahorro energético del 43 por ciento en todos los países industrializados era un límite accesible; la estimación de José Goldemberg, del Ministerio de Ciencia y Tecnología de Brasil, de un 69 % de ahorro es demasiado radical.

Dados los condicionantes, sociales y financieros que impone el ahorro energético, propongo un incremento del uso de la energía nuclear desde su nivel actual de 400 GW a 2 terawatt (1 TW es igual a 1000 GW), para el año 2030 (y mayor en adelante), conjuntamente con la evolución de los actuales tipos de reactores, así como el desarrollo de técnicas con rendimientos superiores a las actuales. La mayor potencia disponible —equivalente a 3,7 TW térmicos— serviría no sólo para producir energía eléctrica, sino también para transformar gas natural en hidrógeno, un combustible muy prometedor. Esta propuesta está en la línea de la recomendación apun-



4. EL DISEÑO DE LA CONTENCION de los RAL asegura que, en caso de accidente, los fragmentos del núcleo y la radiactividad no salgan al exterior de la central. La estructura de hormigón tiene un revestimiento interior de acero, de 40 milímetros de espesor, y está dotada de aperturas de ventilación que permiten la refrigeración por circulación natural de aire (*a*). El aire fluye hacia la cúpula del edificio, donde un filtro impide la salida de radiactividad al exterior (*b*). Si el núcleo del reactor explotase, unos largos cables de acero absorberían y disiparían la energía de los fragmentos que salieran despedidos hacia arriba (*c*); una rejilla y una cuba de protección, situadas debajo del núcleo, impiden que, de fundirse éste, llegara al suelo (*d*). En el caso de un aumento excesivo de presión, unas válvulas deslizantes cerrarían todas las tuberías impidiendo la salida de radiactividad (*e*). El esquema está basado en el diseño realizado por la Universidad y el Centro de Investigación Nuclear de Karlsruhe (Alemania).

tada en el documento final de la Conferencia de Toronto: la revisión del papel de la energía nuclear.

Incluso dejando aparte la amenaza del calentamiento global, el incremento de producción de energía nuclear sigue resultando atractivo. Mi propuesta recoge las estimaciones del Instituto Internacional de Sistemas Aplicados de Análisis y de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) de 1975 y 1986. Razones económicas y de prudencia ecológica aconsejan una mayor dependencia de la energía nuclear, aunque sólo sea para hacer frente con éxito a las vicisitudes del abastecimiento energético.

La generación de dos terawatt exige la operación de 2500 reactores nucleares, así como garantías de seguridad, un adecuado tratamiento de los residuos, rígidos impedimentos contra la proliferación de armas nucleares y, sobre todo, la aceptación social. Aunque un aumento de tal magnitud parece irrealizable, la experiencia de los tiempos empleados en la construcción de centrales señala lo contrario. Cada año deben conectarse a la red unos 40 GW para poder alcanzar el objetivo de 2 TW. En 1984 y 1985 entraron en servicio más de 30 GW; los 40 GW anuales no quedan muy lejos.

Desde sus comienzos, en los años cincuenta, la industria nuclear ha revisado meticulosamente los baremos de seguridad, pero los conceptos básicos del análisis han evolucionado con el tiempo. Hoy día, el tratamiento habitual de la seguridad se funda en el análisis probabilístico de riesgos (APR). En este tipo de análisis, riesgo es la probabilidad de que un suceso ocurra multiplicado por sus consecuencias. La definición se ha tomado de las compañías de seguros, donde se entiende por riesgo la probabilidad de un suceso multiplicado por su coste económico.

La aplicación del APR a la seguridad nuclear adolece, sin embargo, de algunas limitaciones. Por ejemplo, su incapacidad para considerar todas las implicaciones de los grandes accidentes nucleares es, en parte, responsable de la falta de confianza ciudadana en la energía nuclear. Dando un paso más, la probabilidad de un suceso catastrófico se considera muy baja; pero no se dispone de estadísticas, ya que tales sucesos no se han producido. Se considera importante un suceso cuando es compendio de muchos pequeños fallos en cadena, cada uno de los cuales lleva aparejada su propia estadística, lo que redunda en una incertidumbre aún mayor.

Además, estas bajísimas probabilidades implican largos períodos, casi eternidades, para que ocurra una catástrofe. Pero la lógica probabilística no incorpora la noción de eternidad y, por tanto, los daños producidos por grandes catástrofes escapan a una evaluación racional. El APR considera sucesos catastróficos de muy baja probabilidad, cuando, en realidad, los ciudadanos sólo se interesan por las consecuencias de estos sucesos, no por su probabilidad.

Para que el APR fuera significativo, necesitaría ser comparativo; por ejemplo, que el cotejo de los proyectos de los reactores nucleares hubiera identificado y corregido satisfactoriamente los defectos de diseño. Tales análisis son especialmente sensibles y sofisticados desde el punto de vista de la posible identificación de errores de seguridad. Aplicando el APR al diseño de los modernos reactores nucleares, los ingenieros estiman que la probabilidad de que se funda el núcleo de un RAL es de una vez en 20.000 años. En el supuesto de que tal fusión ocurriera, la probabilidad del consiguiente escape radiactivo podría rebajarse aún más con una instalación de contención bien proyectada. De este modo, sería de esperar que sólo una vez cada 100.000 años se produjera una gran fuga radiactiva.

Cuando el APR se aplica al supuesto de 400 GW, la probabilidad de un escape masivo de radiactividad es de uno cada 200 años. En el caso de 2 TW, un escape de estas características podría ocurrir cada 40 años, ya que el número de reactores sería cinco veces mayor y, por tanto, la probabilidad de accidente se multiplicaría también por cinco. Se trata de una frecuencia a todas luces inaceptable; resulta, pues, obligado que la seguridad de los reactores mejore sus cifras. Yo preveo que la probabilidad de que se funda un núcleo sin que trascienda la pared de contención será menor que una vez cada 4000 años.

Mas, aunque esta reducidísima frecuencia se compare con la probabilidad de accidentes asociados a otras fuentes de energía (verbigracia, explosión de una refinería de petróleo), el temor a un accidente nuclear persiste, sobre todo, después de los casos de Chernobyl (Unión Soviética) y Three Mile Island, cerca de Harrisburg (Estados Unidos). Mientras que en Harrisburg, el 28 de marzo de 1978, la estructura de contención se comportó satisfactoriamente y no hubo fugas apreciables de radiactividad al exterior, en Chernobyl, el 26 de abril de 1986, la casi total ausencia de contención provocó una contaminación masiva.

Debemos avanzar, pues, hacia la construcción de estructuras de contención que prevengan las consecuencias de una fusión del interior u otros accidentes nucleares. Para conseguir una contención eficaz, sugiero dejar de considerar el riesgo del suceso y valorar, por separado, frecuencia y consecuencias. Por tanto, hemos de limitar, desde el proyecto, los daños asociados a un gran accidente, al margen de cuán reducida sea su probabilidad. El proyecto y la construcción correctos de la contención deben proteger, en el exterior del reactor, tanto a las personas como al ambiente, limitando las consecuencias del fallo.

Para la utilización, a gran escala, de la energía nuclear, las contenciones más exigentes serán un elemento básico. Los nuevos diseños permiten la exclusión "determinista" de las consecuencias catastróficas de la fusión del núcleo con paso del elemento fundido al suelo del edificio de contención o las explosiones de vapor. Hans Henning Hennies, Günter Kessler y Josef Ebil, de la Universidad y del Centro de Investigaciones Nucleares de Karlsruhe (Alemania), han analizado recientemente la viabilidad de una mejora en el diseño de la contención de los RAL. A primera vista, las contenciones existentes tienen mucho en común con este diseño, pero la diferencia clave estriba en que el proyecto de Karlsruhe va más allá en cada una de las características.

El diseño incluye una refrigeración de emergencia por circulación natural de aire entre la pared de hormigón de la contención y su revestimiento interior de acero, aun en caso de altas presiones. Cualquier producto radiactivo que pudiera ser arrastrado por el aire refrigerante sería filtrado en la parte superior de la cúpula. Asimismo, dispone de una cuba de protección en la parte inferior del núcleo, que, caso de fundirse éste, evitaría que llegara a la base del edificio de contención. Unos largos cables de acero absorberían y disiparían la energía de cualquier fragmento del núcleo producido por una explosión.

Otras mejoras de seguridad introducidas son las llamadas defensas pasivas. En reactores con seguridad pasiva deben transcurrir varios días antes de que intervenga el hombre para domeñar la radiactividad. Para ello se cuenta con una gran capacidad de ab-

sorción del calor producido en el núcleo y una red de tuberías que bombean refrigerante al reactor. El núcleo debe tener una gran superficie, en relación con su volumen, que permita la refrigeración del calor tanto por difusión como por convección natural. Otros diseños, que apuestan por la simplicidad, contribuyen de distintas formas a mejorar la seguridad.

Además de las medidas de seguridad, en la coyuntura de 2 TW se debe también considerar el suministro de combustible. Es imprescindible un ciclo eficiente en el que se fisione el 60 por ciento del uranio, en lugar del 0,6 por ciento. Tal como indicaba antes, en el supuesto de 400 GW y un ciclo sin reprocesamiento del combustible quemado, las reservas de uranio se agotarían en 100 años. Si la potencia instalada fuera de 2 TW, el uranio duraría 20 años.

El reactor reproductor rápido (RRR) —así denominado porque produce más combustible que el que consume, al transformar uranio no fisionable en plutonio fisionable— es, entre las técnicas disponibles hoy día, la más rentable. El RRR no ofrece problemas técnicos y está próxima su viabilidad comercial. Dado que este tipo de reactor puede centuplicar, con la misma cantidad de uranio, la energía producida por los RAL, representa un importante avance tecnológico. Si todo el uranio se fisionara en los RRR, la energía nuclear que podría generarse sería de, por lo menos, 35.000 TW térmicos, en vez de los 70 TW que ahora se generan (en parte, porque el mayor coste del uranio adicional de menor calidad, cuya extracción es mucho más dificultosa, se podría compensar con el ahorro producido por el rendimiento de los reproductores).

Los RRR requieren reprocesamiento. Si los RRR y los RAL generaran 2 TW, producirían 35.000 toneladas de elementos combustibles irradiados. En este supuesto habría que abrir cada dos años un depósito de residuos radiactivos permanente, una perspectiva sombría. En el reprocesamiento se extrae del combustible usado el plutonio creado durante la fisión, así como el uranio sin gastar, mediante un procedimiento químico. (El combustible usado se disuelve en ácido nítrico, formando una solución; en ésta, también por procedimientos químicos, pueden separarse el uranio y el plutonio de los productos de fisión, o cenizas nucleares.)

Las cuatro plantas de reprocesamiento actualmente en servicio —Sellafield (Gran Bretaña), la Hague (Francia), Tarapur (India) y Tokai (Japón)—, procesan un total de 2040 toneladas de uranio al año. Otras cuatro plantas, en fase ahora de construcción, reprocesarán otras 2500 toneladas anuales, lo que supondrá una capacidad total de 4540 toneladas al año. (No se conocen datos de la capacidad de reprocesamiento de la Unión Soviética y China.) Estas instalaciones, unas ya en funcionamiento y otras en fase de construcción, podrán reprocesar la mitad sólo de las 10.000 toneladas de combustible gastado que se producen anualmente y estarán lejos de poder hacer frente a las 35.000 toneladas anuales antes mencionadas.

Además de las mejoras en la seguridad y en el rendimiento del ciclo de combustible nos aguardan otras tecnologías. La fusión libera energía uniendo núcleos en lugar de romperlos. Aunque se trata de una técnica de muy difícil consecución y no puede incluirse entre las proyecciones energéticas inmediatas, es un recurso prometedor. El proyecto internacional del Reactor Experimental Tokamak —una empresa conjunta que engloba a Estados Unidos, Unión Soviética, Japón y Europa— apunta que, para mediados de la próxima centuria, la fusión será, con gran probabilidad, una realidad comercial.

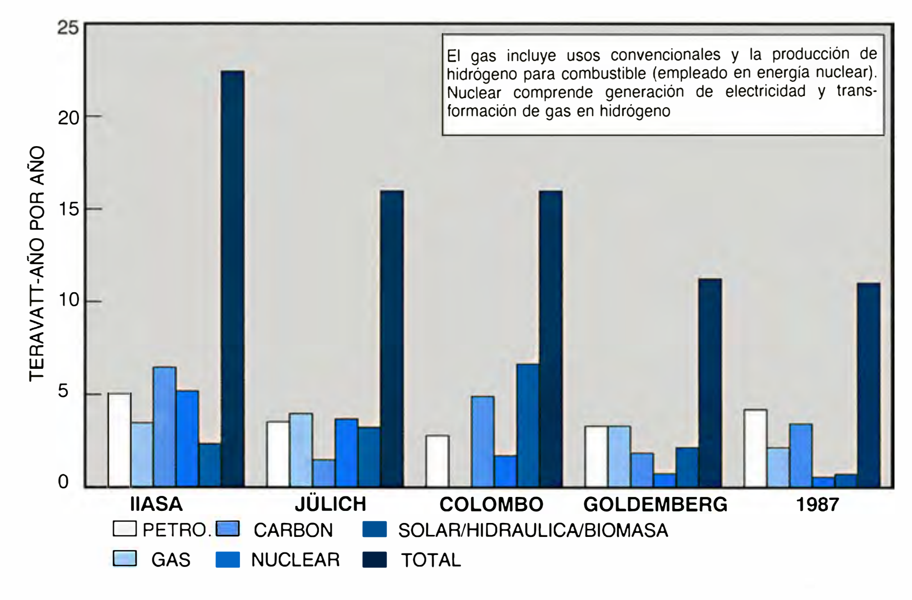
Pese a lo que suele creerse, la técnica actual de fusión no es de suyo limpia, ya que las fugas de neutrones convierten los materiales adyacentes y el reactor en elementos radiactivos. Otras técnicas de fusión, con ciclos de combustible más avanzados, podrían lograr reducir la emisión de neutrones, permitiendo que la fusión llegara a ser una fuente de energía limpia.

Algún día, reactores híbridos podrían combinar la fusión y la fisión. Los neutrones procedentes de las reacciones de fusión podrían ser absorbidos por una capa de material fisionable, convirtiendo uranio natural u otros elementos en material de fisión.

Otra técnica naciente, la de reproducción eléctrica, podría resultar también de interés. Un reproductor eléctrico lanzaría protones sobre un blanco de núcleos de uranio o de otro elemento. El elemento resultante serviría de combustible en los reactores de fisión.

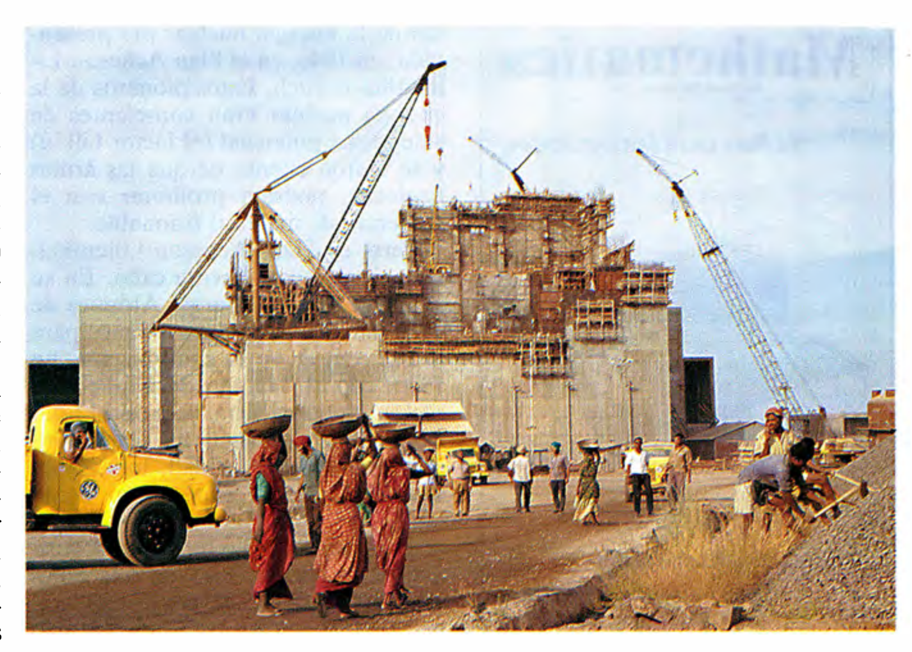
Finalmente, la segunda generación del reprocesamiento químico no sólo podrá separar el plutonio y el uranio de los productos de fisión, sino que también podrá extraer, durante el proceso, los isótopos de larga vida más incómodos. Este reprocesamiento puede conducir a una segunda generación de residuos radiactivos definitivos, que requerirán un espacio mucho menor de almacenamiento una vez aislados. De esa manera, no sería necesario abrir un nuevo depósito de residuos cada dos años.

Aunque la construcción de 2000 nuevos reactores es técnicamente po-



5. DIFERENTES PROPUESTAS de necesidades energéticas (en terawatt-año por año) para el 2030 comparadas con la energía procedente de las distintas fuentes en 1987. Las propuestas del Instituto Internacional de Análisis Aplicados de Sistemas, de 1975, y de Umberto P. Colombo, de 1979, son anteriores a los actuales modelos del efecto de invernadero; las propuestas de Jülich, de 1989, y de la anterior (1988) de José Goldemberg —para el 2020— tienen en consideración el cambio climático.

sible, se abre un abismo entre la técnica y las reticencias políticas y sociales. La Comisión Mundial para el Medio Ambiente y el Desarrollo publicó, en 1987, un informe titulado "Nuestro Futuro Común", en el cual reconocía las posibilidades de la energía nuclear, pero mostraba su preocupación para aceptar un parque de 2500 reactores sin ciertas restricciones legales de obligado cumplimiento. El informe Brundtland —que debe su nombre a Gro Harlem Brundtland, presidenta de la comisión— estipula que debe existir notificación previa de los procedimientos de actuación en caso de accidente nuclear o de escapes de grandes cantidades de radiactividad, preparación para responder ante emergencias, regulación del transporte de materiales radiactivos, normalización de los sistemas de preparación de los operadores y de los procedimientos de licencia, normativa de seguridad y operación de los reactores, información sobre descargas rutinarias o accidentales, criterios de selección de emplazamientos, especificaciones para los depósitos de residuos y procedimientos para la descontaminación y el desmantelamiento. No deja de llamar la atención que estas preocupaciones sean más institucionales que técnicas.



6. CENTRAL DE TARAPUR en el estado de Maharashtra (India), del tipo reactor de agua ligera (RAL). Con una potencia de 300 megawatt, fue conectado a la red en 1969. En Tarapur se encuentra una de las cuatro plantas de reprocesamiento químico que hoy operan en todo el mundo.

Muchas de ellas han sido ya asumidas por organismos internacionales, como la IAEA, el Euratom y la Organización de Países Productores de Energía Nuclear, entre otros. Pero, desgraciadamente, las normas dictadas por estos organismos no son de obligado cumplimiento para todos los países y, sin poderes ejecutivos, es difícil garantizar el control de calidad, el funcionamiento correcto y la gestión adecuada. Peter Beck, que ha trabajado en la Shell en Londres, dice que "muchos de nosotros no hemos aprendido la lección más importante de Chernobyl: el carácter internacional de la seguridad nuclear. En otras palabras, la ineludible realidad de que la seguridad del proyecto y del funcionamiento en cualquier lugar concierne a todo el mundo, sin importar fronteras ni distancias".

Por desgracia, el consenso internacional, que, por su propia naturaleza, necesita la energía nuclear, se ve dificultado por los debates internos de cada país sobre el reprocesamiento y almacenamiento de los residuos. Estas polémicas se pueden convertir en el principal obstáculo para la expansión de la energía nuclear.

Los esfuerzos realizados en los últimos 20 años para crear instalaciones privadas de reprocesamiento —es decir, no operadas por las administraciones públicas— han tenido un éxito relativo. La Hague (Francia) y Sellafield (Gran Bretaña) son instalaciones privadas, aunque, en ambos casos, existe una participación gubernamental. Intentos similares han fracasado en Alemania y en Estados Unidos. En la década de los setenta, la Administración Carter aprobó el Acta de No-Proliferación Nuclear, con la cual se dictaminaba el fin de toda actividad de reprocesamiento de carácter privado, esperando que otros países actuaran de forma similar. La construcción de la planta de Wackersdorf (Alemania) se paralizó el pasado año, obligando a las compañías eléctricas alemanas a acudir a Francia y Gran Bretaña para el reprocesamiento.

La controversia sobre los residuos sigue en pleno auge, dado que los reactores en funcionamiento indefectiblemente los producen. Pero existen soluciones. Karl P. Cohen, que trabajó para General Electric Company, propone que los Estados Unidos adopten una postura intermedia. Sugiere que el combustible quemado se almacene, temporalmente, en vertederos, al menos durante 100 años. Sin embargo, el almacenamiento se convertirá en un problema mundial. Tiene que existir una organización internacional —preferiblemente la IAEA, o alguna otra bajo su control— que construya y gestione una o varias instalaciones transitorias para depósitos de residuos. Su capacidad habría de ser, inicialmente, de unas 400.000 toneladas de metales pesados. Y podrían estar situados en islas o en penínsulas. Tanto Cesare Marchetti, en los comienzos de los setenta, como yo mismo, en 1976, propusimos soluciones parecidas a ésta.

Las instalaciones internacionales para depósito de residuos ofrecen varias ventajas. Facilitan el desarrollo de instituciones de carácter internacional que quedarían al margen de las políticas nacionales de cada país. Estas plantas pueden conceder a la industria nuclear el tiempo necesario para desarrollar científica, tecnológica e institucionalmente nuevos métodos de almacenamiento de residuos. El acceso a estas instalaciones ofrecería la posibilidad de desarrollo nuclear en países donde, por culpa de los residuos, la rechazaban. Y pueden desempeñar, también, un papel primordial en la reducción de las armas nucleares y en la garantía de la no-proliferación de materiales nucleares.

Si su construcción y funcionamiento fueran satisfactorios, podrían convertirse en la base de un programa de depósitos permanentes de residuos. Y si los depósitos se eligieran con consenso internacional, las plantas de reprocesamiento de combustible y otras instalaciones nucleares podrían también ubicarse en estos emplazamientos.

La idea de la regulación internacio-

nal de la energía nuclear fue presentada, en 1946, en el Plan Acheson-Lilienthal-Baruch. Estos pioneros de la energía nuclear eran conscientes de su enorme potencial (el factor billón) y se dieron cuenta de que las armas nucleares podrían proliferar con el comercio de material fisionable.

Pero el Plan Acheson-Lilienthal-Baruch nunca se llevó a cabo. En su lugar, la Ley de Energía Atómica de 1954 inició el Programa Atomos para la Paz. Que tuvo su continuación, en 1970, con el Tratado de No-Proliferación Nuclear, firmado por 140 naciones, que establecía un sistema internacional de seguridad, todavía en vigencia, bajo la supervisión de la IAEA.

El sistema de garantías de seguridad de la IAEA se basa en tres criterios: contabilidad de materiales, supervisión y control, todo ello dentro de un marco de objetividad, racionalidad y eficacia. Un consenso casi general reconoce que las medidas cuantitativas son las que mejor facilitan el cumplimiento de estos criterios. La contabilidad de materiales es el más importante de los tres. En la mayoría de los reactores, la contabilidad de los materiales permite la identificación y la cuantificación con relativa facilidad. Más difícil es ese control en las instalaciones de reprocesamiento, enriquecimiento y fabricación de combustible, lo que exige, en estos sitios, un incremento importante de las medidas de control y la permanencia constante de inspectores.

Conviene recordar que la proliferación de armas nucleares no está necesariamente ligada a los usos civiles de la energía nuclear. De hecho, cualquier artilugio que permita el enriquecimiento del uranio natural por centrifugación puede proporcionar el acceso a dicho armamento. Y existe además una gran diferencia entre un mecanismo nuclear artesanal y un arsenal nuclear operativo. Asegurar la no-proliferación no es una tarea sencilla.

El régimen de control de la no-proliferación vigente hoy día, amalgama de medidas técnicas, institucionales y políticas, funciona bastante bien, esto es, me permito evaluarlo positivamente. Por tanto, no creo que una expansión de la capacidad nuclear de 400 GW a 2 TW contribuya a la proliferación de armamento, si se mantienen estos patrones. No debiera ser difícil aplicar el mismo sistema de contabilidad de materiales a los nuevos reactores. Y como las pocas plantas de enriquecimiento en funcionamiento están perfectamente controladas, multiplicar por cinco el número de estas instalaciones y de las de fabricación de combustible no debe presentar dificultades de control.

De intento, no hemos aludido en ningún momento a la cuestión de los costes. Podría pensarse que, en algunos países, la energía nuclear está en regresión debido a los incrementos de costos y al tiempo de construcción de las nuevas centrales. Los costes, empero, están fijados por la demanda del mercado. Los obstáculos reales para la expansión de la energía nuclear se hallan en la falta de definición que caracteriza a las normas reguladoras y los permisos, así como en la oposición ciudadana. Retrasos de unos ocho años en la construcción de un reactor han llegado a doblar su precio.

A la energía nuclear corresponderá un papel primordial en el futuro, pero deberá administrarse con sumo cuidado. Las normas de seguridad, los proyectos, los depósitos de residuos y el ciclo completo del combustible habrán de quedar bajo la jurisdicción de una agencia internacional de control. Sólo entonces podrá aprovecharse todo el potencial que encierra. A la vista del crecimiento demográfico mundial y de los problemas derivados del mismo, yo dudo sinceramente de que desandar el camino nos permita dominar el futuro. Tenemos que ir hacia delante.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

GEOENGINEERING AND THE ENERGY ISLAND. Cesare Marchetti en *Second Status Report of the IIASA Proyect on Energy Systems*. Dirigido por W. Häfele et al. International Institute for Applied Systems Analysis RR-76-1, 1975.

ENERGY IN A FINITE WORLD, Vols. 1 y 2. International Institute for Applied Systems Analysis. Ballinger Publishing Co., 1981.

NUCLEAR ENERGY AND PROLIFERATION: A LONGER PERSPECTIVE. Alvin M. Weinberg en *The Nuclear Connection: A Reassessment of Nuclear Power and Nuclear Proliferation*. Dirigido por Alvin Weinberg et al. Washington Institute Press, 1985.

EXPLORING THE COMPETITIVE POTENTIAL OF MAGNETIC FUSION ENERGY: THE INTERACTION OF ECONOMICS WITH SAFETY AND ENVIRONMENTAL CHARACTERISTICS. John Holdren et al. en *Fusion Technology*, vol. 13, n.º 1, págs. 7-56; enero de 1988.

TECHNICAL SAFETY MEASURES AND RULES IN THE NUCLEAR FIELD. W. Häfele en *Atomwirtschaft, Atomtechnik*; noviembre de 1989.



Energía procedente del Sol

Las diversas formas de energía solar, entre ellas la eólica y la biomasa, ofrecen procedimientos ecológicamente benignos para generar electricidad y fabricar combustibles. Habrá técnicas competitivas antes del año 2000

Carl J. Weinberg y Robert H. Williams

La preocupación por la contaminación atmosférica urbana, lluvia ácida, vertidos de petróleo, riesgos nucleares y calentamiento global invitan a reconsiderar las opciones alternativas al carbón, petróleo y energía nuclear. Aunque las fuentes alternativas de energía no se hallan libres de todo pecado de contaminación, hay un amplio abanico de opciones que son, desde el punto de vista ambiental, mucho menos perjudiciales que los métodos habituales de producción de energía. Las técnicas más prometedoras domeñan la energía solar. Examinaremos aquí un grupo seleccionado de técnicas para producir electricidad y combustibles y expondremos estrategias para convertir en realidad estas posibilidades.

Avanzan a paso firme varias técnicas solares y las infraestructuras industriales necesarias para explotarlas. La energía eólica, la solar térmica y las técnicas de la biomasa se mostrarán probablemente competitivas, en relación a su coste, durante el decenio de los noventa. La electricidad fotovoltaica y los combustibles líquidos obtenidos a partir de la biomasa deben serlo a la vuelta del siglo. Aunque es prematuro predecir cuál de ellas dominará, está claro que la producción de energía solar se diversificará en técnicas y en escala, y presentará notables variaciones regionales. Estas características conllevan la necesidad de nuevos enfoques, tanto para introducir como para gestionar las técnicas solares.

La energía hidroeléctrica es la fuente de energía solar más ampliamente utilizada. En este caso, el papel del sol es indirecto. La radiación solar evapora el agua, que después cae en forma de lluvia; ésta acaba por ir a parar a los ríos, donde mueve turbinas generadoras en su camino hacia el mar. En 1987, la energía hidroeléctrica representó el 17 por ciento de la producción de electricidad en los países industrializados y el 31 por ciento en los subdesarrollados. La Conferencia Mundial de la Energía estimó que la cantidad de energía hidroeléctrica que se podría explotar comercialmente era casi cinco veces la que ahora se genera. El potencial hidroeléctrico en los países en vías de desarrollo es muy notable: casi 10 veces la cantidad actual.

Pero no parece que llegue a aprovecharse semejante potencial, ya que los proyectos hidroeléctricos constituyen motivo creciente de preocupación ecológica. Se objeta, a este propósito, la pérdida de grandes superficies de tierras anegadas por las instalaciones hidroeléctricas, la posibilidad de roturas catastróficas de las presas y otras dificultades sanitarias y ecológicas. Ahora bien, si la electricidad se usara de forma inteligente y se produjera un crecimiento lento de la demanda, hasta los limitados recursos sin utilizar acotados por las restricciones ambientales podrían satisfacer una parte sustancial de las necesidades futuras de energía eléctrica.

De las restantes opciones de energía eléctrica de origen solar, la eólica es la que se halla más cerca de conseguir la rentabilidad económica. El viento es energía solar ya transformada en energía mecánica; por eso, su conversión ulterior en electricidad se puede realizar con alto rendimiento.

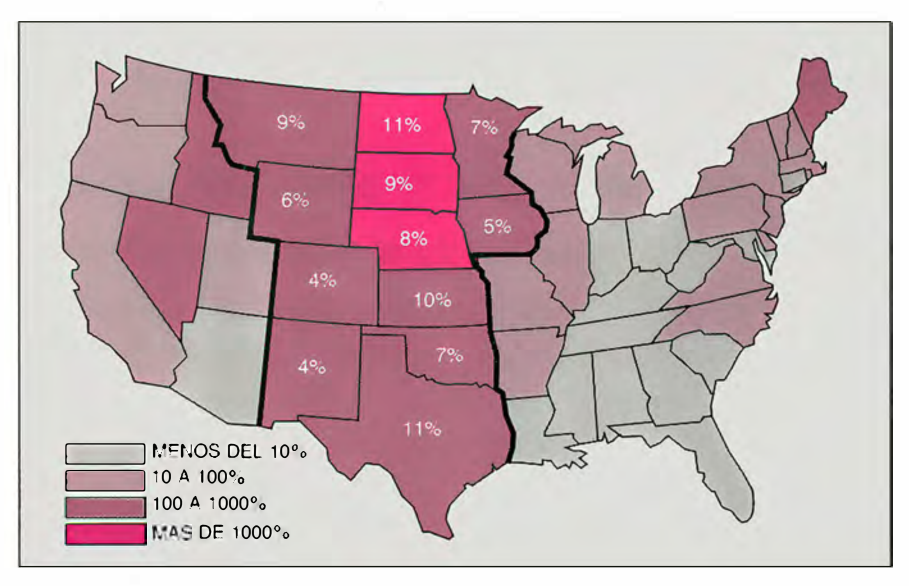
Durante el decenio de los ochenta se pusieron en servicio en todo el globo instalaciones con una capacidad de generación de energía eólica de unos 1660 megawatt (un megawatt es un millón de watt). Del total, el 85 por ciento corresponde a California, la mayor parte en Altamont Pass, en territorio servido por la Pacific Gas & Electric Company (PG&E), donde hay ahora unos 7500 aerogeneradores. El florecimiento californiano de la energía eólica se debió en gran parte a una política fiscal favorable y a los altos precios que pagaban las eléctricas por la energía de origen eólico a mediados de los años ochenta. Ambos incentivos se han suprimido, pero la energía de origen eólico continúa creciendo en California, si bien a un ritmo más lento.

Los parques eólicos de Altamont eran, se decía con malicia, refugio contra los impuestos. La verdad es que los primeros años fueron difíciles. Los incentivos fiscales estimularon la rápida construcción de aerogeneradores cuyo diseño no se había sometido a pruebas rigurosas, y las averías menudeaban. Hoy, resueltos la mayoría de los problemas, la economía de la generación eólica ha mejorado notablemente. Desde 1981, el coste de la energía eléctrica generada por fuerza eólica ha caído en casi un orden de magnitud.

De las reducciones en coste, pocas

1. PARQUES EOLICOS de Altamont Pass (California). Cuentan con 7500 turbinas eólicas que son propiedad de empresas autónomas que producen electricidad y la venden a la compañía Pacific Gas & Electric. Durante el decenio de 1980, las técnicas de producción en masa y los avances en las estrategias de instalación y gestión redujeron los costes de la electricidad eólica a su décima parte. Los sistemas modulares de energía solar son propicios par tal recorte financiero.

CARL J. WEINBERG y ROBERT H. WILLIAMS comparten el objetivo de crear una economía energética viable. Weinberg es director de investigación y desarrollo de Pacific Gas & Electric Company, donde se dedica a sistemas eólicos, solares térmicos, fotovoltaicos y geotérmicos, así como a sistemas avanzados de distribución de energía. Forma parte de la Asociación Americana de Energía Eólica y de la Asociación de Industrias de Energía Solar. Williams, físico investigador del Centro de Energía y Estudios Ambientales de la Universidad de Princeton, estudia la evaluación de técnicas y políticas relativas a la energía. Ha escrito varios libros sobre el tema.



2. DEMANDA DE ELECTRICIDAD EN LOS EE.UU., que podría satisfacerse mediante cuatro millones de turbinas eólicas de 500 kilowatt, distantes medio kilómetro y tendidas sobre una superficie del 10 por ciento del suelo donde el viento es favorable. Los colores muestran los potenciales de electricidad eólica expresados en porcentaje respecto a la producción eléctrica en el correspondiente estado. Aproximadamente el 90 por ciento del potencial eólico de los EE.UU. se concentra en 12 estados, delimitados por la línea de trazo grueso. Las cifras se refieren a los porcentajes del potencial total de electricidad eólica. La electricidad de origen eólico en tales estados podría exceder ampliamente la demanda local; se podría exportar en grandes cantidades, o bien usarla para hidrógeno.

son atribuibles a innovaciones técnicas. Salvo las paletas de material compuesto ligero y las turbinas controladas por microprocesador, los aerogeneradores comerciales de Altamont no incorporan novedades substanciales, aerodinámicas o de proyecto, respecto a los que se construyeron hace 50 años. La reducción de costos de la energía eólica obedece, sobre todo, a la experiencia de los años, que lleva consigo la introducción de métodos normalizados. En las industrias, los fabricantes se aplicaron a las técnicas de producción en masa; en el campo, los especialistas aprendieron a escoger los emplazamientos mejores y a acomodar el calendario de mantenimiento a los períodos de viento flojo.

En las centrales grandes (500 a 1000 megawatt por unidad), sean de combustible fósil o nucleares, la construcción de cada unidad resulta compleja y dura mucho tiempo, tanto que los avances en la curva de aprendizaje son lentos en el mejor de los casos y cuesta crear equipos normalizados. Por contra, las unidades pequeñas (de 50 a 300 kilowatt) y la relativa sencillez de la técnica eólica y de otras varias de origen solar permite producirlas en serie. El tiempo requerido desde el proyecto inicial hasta la entrada en servicio es tan corto, que pueden determinarse las mejoras necesarias mediante pruebas in situ e incorporarse rápidamente en proyectos modificados.

Las nuevas turbinas eólicas, de técnica más depurada, prometen ulteriores ahorros. PG&E está inmersa en un proyecto de cinco años de duración en cooperación con el Instituto de Investigación de Energía Eléctrica (IIEE, o EPRI), de Palo Alto, y U. S. Windpower, de Livermore, ambos en California, para desarrollar, construir y probar prototipos de una turbina eólica de 300 kilowatt y de velocidad variable. Estas turbinas tendrán paletas y refinados controles electrónicos que permitirán al rotor girar a la velocidad óptima con muy diversas condiciones de viento, incrementando así el aprovechamiento de energía. Estas innovaciones ofrecen también otros beneficios: disminución de la fatiga de los materiales y reducción de costes de mantenimiento, entre otros.

Se podría sacar más partido a la energía eólica con mejores paletas, controles electrónicos "inteligentes", que ajusten los parámetros operativos del sistema con arreglo a las características del viento, y materiales cada vez más avanzados que proporcionen componentes más ligeros y tenaces. Tomadas en conjunto, esas nuevas técnicas podrían hacer rentable la energía eólica.

La economía de la energía eólica depende del valor, además del coste. Podría creerse que, dado el carácter intermitente del viento, la electricidad de origen eólico sin almacenar no tendría un valor superior al del combustible más costos de funcionamiento ahorrados, puesto que no se habría de producir esa energía en las centrales convencionales. Pero la energía eólica presenta también a su favor que reduce la necesidad de construir más de tales centrales.

El valor de la energía eólica depende de dos factores: condiciones del emplazamiento y naturaleza del perfil de demanda de la compañía local. En tanto en cuanto la energía eólica esté disponible a las horas puntas de demanda, será especialmente valiosa, porque en las hora de demanda máxima el suministro es más caro. En el norte de California, la disponibilidad de potencia eólica promediada para los dos emplazamientos más importantes (Altamont y Solano) es del 50 por ciento de la capacidad nominal de producción en este período. Por mor de comparación, la disponibilidad de las centrales térmicas es del 80 al 90 por ciento de la capacidad nominal.

La energía eólica es bastante limpia. Se han resuelto, además, la mayoría de problemas. Uno de ellos era el ruido, que las turbinas modernas han amortiguado hasta asimilarlo casi al rumor del viento. Las paletas de acero pueden entorpecer la recepción de la televisión, pero esto no ha sido problema con las turbinas de Altamont, cuyos rotores están construidos en su mayor parte de fibra de vidrio o madera y resinas. Sí constituye allí quizás un problema la muerte de aves, en cuya resolución se está trabajando. Tal vez sea la falta de estética su peor inconveniente: a mucha gente no le gustan los molinos de viento en el paisaje.

Alrededor del 90 por ciento del potencial de energía eólica en los EE.UU. corresponde a doce estados contiguos [*véase la figura 2*], donde la explotación ganadera y el cultivo extensivo de cereal constituyen las principales actividades económicas. La energía eólica podría ser un buen vecino para ese sector agropecuario. La experiencia enseña que el valor del suelo aumenta rápidamente cuando se convierte en parques eólicos. En Altamont, los precios subieron de 1000 a 5000 dólares por hectárea, reflejando así las tasas pagadas a los propietarios por el uso de la tierra. Los granjeros perdieron sólo alrededor del 5 por cien de la tierra de pasto en Altamont, donde el ganado puede pastar alrededor de los generadores.

Los recursos eólicos de los EE.UU. se concentran en estados donde las posibilidades de generación son muy superiores a la demanda local. Importa, pues, mejorar las redes de distribución y reducir los costes de transmisión para que a esos estados les re-

sulte rentable exportar cantidades apreciables de electricidad.

La generación eléctrica térmica solar constituye una técnica prometedora para las zonas de copiosa insolación. Se vale de unos espejos colectores que siguen la trayectoria solar y concentran su luz y calor. La luz concentrada calienta un fluido, que se usa en un ciclo de producción de energía.

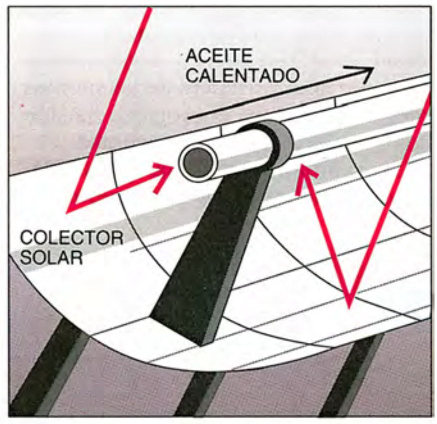
Entre 1984 y 1988 la empresa LUZ, de Los Angeles, instaló varias plantas comerciales de generación térmica solar, con una capacidad de 275 megawatt, en el desierto de Mojowe (California). La compañía tiene otros 80 megawatt en construcción, e instalará otros 300 megawatt en Harper Lake, en el sur de California, en 1994. El sistema LUZ consiste en unos armazones parabólicos de espejos que focalizan la luz solar sobre unas tuberías que transportan aceite. Este se va calentando conforme circula por la tubería y se emplea para crear vapor que impulsa una turbina generadora [*véase la figura 3*]. Se puede usar un quemador de gas natural que complemente, si es preciso, el calor solar.

Lo mismo que la energía eólica, la técnica de la energía solar térmica permite la construcción modular y ofrece las ventajas de la producción en serie. Cada una de las instalaciones de 80 megawatt de Harper Lake constará de 852 unidades de colectores solares de 100 metros de largo, que operarán de manera independiente. Se tardó nueve meses en construir la primera de esas instalaciones, que entró en servicio en 1989; piénsese que de seis a doce años son los plazos habituales para las centrales convencionales. El perfeccionamiento de las técnicas de ingeniería, fabricación y construcción han rebajado el precio de la electricidad de 23 centavos de dólar por kilowatt-hora para la primera instalación LUZ hasta los 10 centavos por kilowatt-hora para las que se construyen hoy.

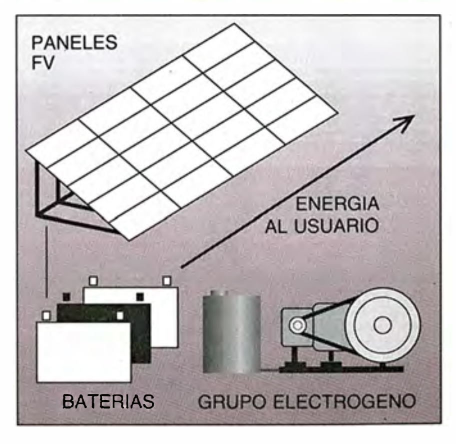
Otra manera de aprovechar la energía solar térmica consiste en emplear espejos que siguen la trayectoria solar y focalizan su luz en un receptor central, donde se alcanzan temperaturas mucho más altas de lo que es factible con los espejos parabólicos. Esta técnica resulta idónea para su uso conjunto con prometedores métodos de almacenamiento de energía solar. En el decenio de los setenta se construyeron plantas piloto, entre ellas la de 10 megawatt Solar One en Daggett (California) y la de cinco megawatt de Almería (España). El proyecto de receptor central en curso más ambicioso es el europeo Phoebus, una planta de 30 megawatt a construir en Jordania. Si tiene éxito, el Phoebus podría asentar la viabilidad de esta opción.

La electricidad fotovoltaica (FV) se produce directamente a partir de la energía solar cuando los fotones absorbidos por un semiconductor crean una corriente eléctrica. (Los fotones son partículas de luz.) La FV es la quintaesencia de la fuente de energía, pues genera electricidad sin contaminación, sin ruido y frecuentemente sin partes móviles. Los sistemas fotovoltaicos sólo necesitan un mantenimiento mínimo y no requieren agua. Son, pues, apropiados para zonas alejadas o áridas. Funcionan en cualquier escala, desde módulos portátiles de algunos watt para comunicaciones e instrumentación remota hasta plantas de varios megawatt que cu-









3. PLANTA ELECTRICA SOLAR TERMICA construida en el desierto de Mojave por la compañía LUZ; produce electricidad que se vende a la empresa Southern California Edison. La luz solar concentrada calienta aceite en las tuberías; el calor del aceite genera vapor que impulsa una turbina generadora (*arriba*). Un quemador de gas natural proporciona el calor suplementario durante los períodos de alta demanda o baja radiación solar. Las células fotovoltaicas que convierten directamente la radiación solar en electricidad son ya rentables desde el punto de vista económico en lugares alejados, como es el caso de la isla australiana de Cocos. Las baterías y un generador diesel suministran la potencia de apoyo (*abajo*).

bren millones de metros cuadrados. Esta flexibilidad de tamaños permite situar los sistemas FV cerca de los usuarios, donde la electricidad producida vale más que en la estación central. Los pequeños sistemas FV son, por tanto, potencialmente rentables incluso en regiones nubosas o de alta latitud, donde el recurso a la energía solar podría parecer descabellado.

Es improbable que los sistemas FV se vean limitados por restricciones del uso de tierra. Un montaje con un rendimiento del 12 por ciento y 40 metros cuadrados, ubicado sobre un tejado orientado al sur en una región que reciba una radiación solar como el promedio de los EE.UU. podría producir electricidad suficiente para alimentar una vivienda norteamericana típica. La cantidad de electricidad FV equivalente a la total generada en los EE.UU. se podría producir en un campo colector de 34.000 kilómetros cuadrados de superficie, es decir, menos del 0,37 por ciento de la extensión del país.

La drástica caída de los costos de la energía FV y el desarrollo de mercados específicos han aumentado la demanda de FV a razón de un 25 por ciento al año. Las ventas anuales mundiales exceden ahora los 40 megawatt de capacidad máxima. El coste actual es todavía cinco veces mayor que el de la electricidad de las fuentes tradicionales, pero el progreso ha sido más rápido de lo que se esperaba.

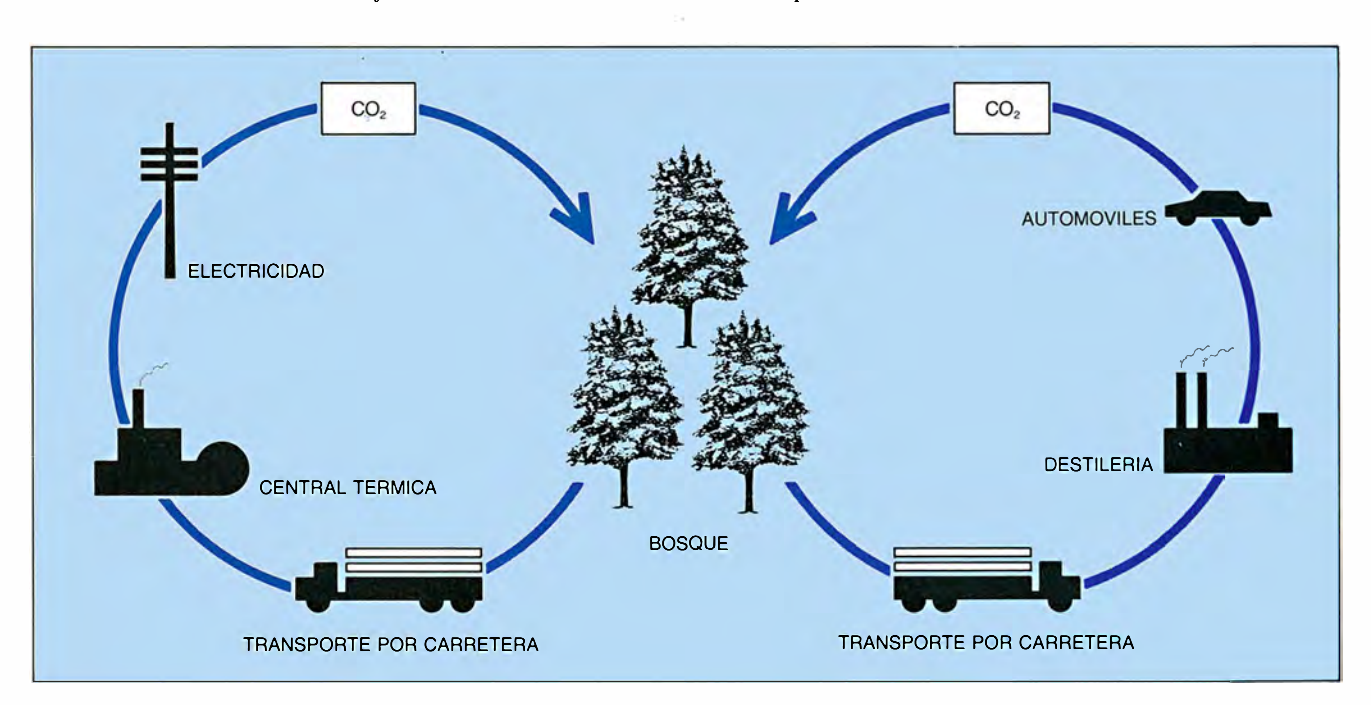
Los rendimientos de las pilas solares en el laboratorio han mejorado desde el 16 al 18 por ciento (mediados del decenio de 1970) hasta el 28,5 por ciento hoy día, en lo que se refiere a las células de silicio cristalino con contacto de punto, y 35 por ciento para una célula de unión de arseniuro de galio-antimoniuro de galio (pila con dos capas que absorben en diferentes partes del espectro solar).

Se está desarrollando una nueva y prometedora clase de pilas o células solares que se preparan con finas capas de materiales semiconductores. Aunque presentan, por lo común, rendimientos más bajos (el más alto alcanzado hasta ahora en el laboratorio es del 16 por ciento), ofrecen a cambio la posibilidad de un coste menor, tal vez la décima parte del que vale un módulo FV actual en el mercado. Las técnicas de producción en serie son las indicadas para fabricar láminas finas, que requieren muy pequeñas cantidades de material activo, con lo que se abarataría su coste. Las películas miden apenas uno o dos micrometros de espesor, la quincuagésima parte del grosor de un cabello humano.

Hay que perfilar todavía mucho antes de que las pilas solares sean competitivas en el mercado global de la energía. El silicio cristalino es eficaz y fiable, pero sus costes de producción persisten elevados. Las técnicas de láminas finas tienen todavía que demostrar niveles adecuados de rendimiento y fiabilidad en los productos comerciales. Conforme baje el precio de los módulos FV, deberá prestarse mayor atención a la reducción de los costes de otros componentes de los sistemas fotovoltaicos, que representan ya la mitad del monto total de dicha técnica.

A fin de evaluar las perspectivas de la generación de electricidad a gran escala, mediante la técnica FV, la compañía PG&E creó un consorcio mixto gobierno-empresa (Photovoltaics for Utility Scale Applications). El proyecto está concebido para llenar el hiato que separa la investigación y desarrollo de FV y su aplicación comercial. Se están sometiendo a prueba distintos sistemas a fin de proporcionar datos comparativos sobre fiabilidad de funcionamiento, prestaciones y costes de mantenimiento, además de diseños originales de sistemas.

Proyectos similares encontramos por todo el mundo. En Japón, la mayoría de las empresas eléctricas se han embarcado en proyectos FV, tales como la instalación experimental de la isla Rokko, donde se están ensayando 100 sistemas FV domésticos conectados a la red de distribución. La principal compañía eléctrica alemana, Rheinisch Westfälisches Elektrizitätwerk, está evaluando varias técnicas FV en una instalación que generará con el tiempo un megawatt de potencia máxima. Italia y España han instalado sistemas aislados para casas y regiones remotas. Italia proyecta instalar además sistemas mayores para generar hasta tres megawatt.

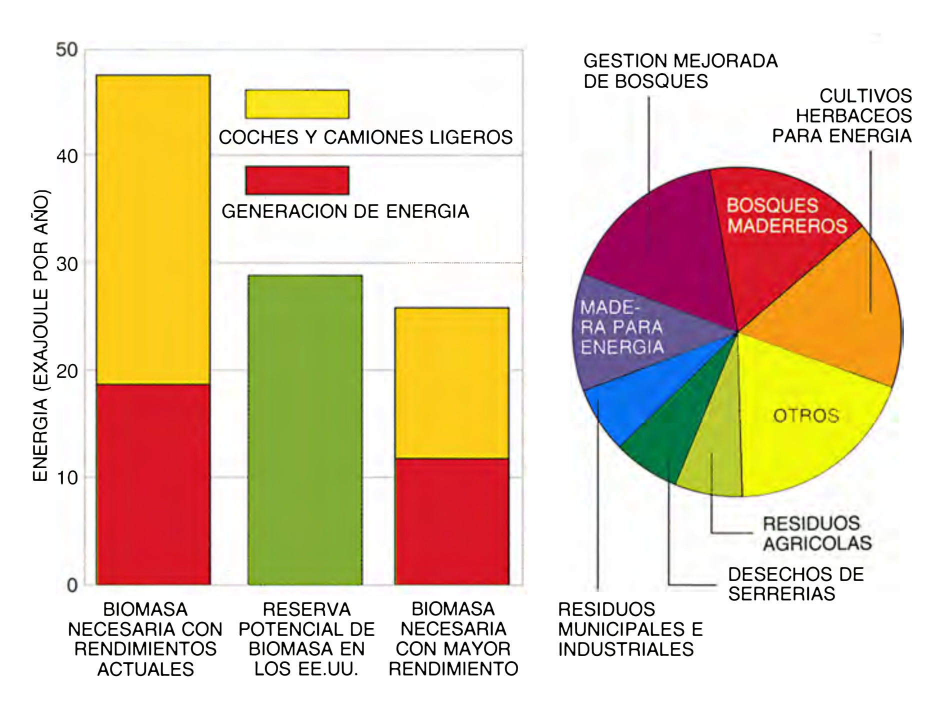


4. COMBUSTIBLES ALCOHOLICOS Y ELECTRICIDAD producidos por biomasa (madera u otra materia vegetal). La combustión de la biomasa desprende dióxido de carbono. Ahora bien, si se cultiva de manera sostenida, la cantidad desprendida se contrarresta con el dióxido de carbono absorbido durante el proceso de la fotosíntesis. La energía de la biomasa, adecuadamente gestionada, no contribuiría al efecto de invernadero.

Será también necesario unir esfuerzos y promover el crecimiento de las industrias fabricantes de FV. Para ello, habrá que identificar segmentos del mercado en los que el valor de la electricidad resulte muy caro. Los productos electrónicos de consumo (calculadoras solares, relojes y artículos por el estilo) han conseguido que las células solares de silicio amorfo dejaran de ser una curiosidad de laboratorio para convertirse en un producto comercial. Estos artículos representan ahora casi el 40 por ciento de las ventas mundiales de FV.

El empleo de sistemas FV ya es rentable en puntos alejados del tendido de distribución: viviendas, estaciones de investigación e instalaciones militares o de comunicaciones en sitios remotos. Varias empresas eléctricas están usando sistemas FV para pequeños suministros. La empresa Georgia Power halló que un sistema de iluminación FV en un punto remoto, que costó 3000 dólares, ahorraba una ampliación de la red valorada en 35.000 dólares.

Las regiones de los países en vías de desarrollo donde la electrificación rural se encuentra en estado embrionario son importantes mercados por los que podrían empezar los sistemas FV. La extensión de las líneas de distribución desde fuentes centrales hasta zonas rurales no suele ser rentable. Por eso, las fuentes de energía descentralizadas como la FV constituyen una alternativa prometedora. Si se suman los costes durante la vida útil, la FV es rentable comparada con los generadores diesel de capacidad inferior a los 20 kilowatt. En la India hay de cuatro a cinco millones de bombas de agua accionadas por motores diesel, cada una de las cuales consume unos 3,5 kilowatt. Este mercado podría, por sí solo, generar ventas anuales de FV de hasta tal vez 1000 megawatt de potencia máxima, es decir, 25 veces las ventas mundiales actuales. Esos segmentos de mercado tan definidos representan una parte minúscula del mercado global de la energía, pero ayudarían a abrir el camino a una industria FV viable que podría comenzar a competir en los mercados energéticos mundiales en torno al final de siglo.



5. ABASTECIMIENTOS DE BIOMASA y su obtención económica de cierto número de fuentes. Podrían desplazar al carbón en la generación de electricidad y al petróleo en los vehículos ligeros, cuyas emisiones de dióxido de carbono representaron en 1987 el 49 por ciento del total estadounidense debido a los combustibles fósiles. Con los actuales niveles de rendimiento, la biomasa podría suministrar dos tercios de las necesidades combinadas de energía. Si se redujera a la mitad el consumo de carburante de los vehículos y se emplearan nuevas turbinas de gas para producir energía, la biomasa podría hallarse capacitada para satisfacer la totalidad de la demanda energética.

Muchos creen que, a causa de su variabilidad, el viento y la energía solar directa pueden satisfacer sólo una pequeña fracción de la demanda total de electricidad sin recurrir a un considerable almacenamiento de energía. La necesidad de almacenamiento depende de la relación temporal entre la disponibilidad de energía de las fuentes renovables y la demanda de la empresa. La cuantía requerida de almacenamiento podría ser, para sorpresa de todos, muy pequeña. En California, la demanda alcanza su máximo diario a media tarde, siendo el máximo anual en verano, justo cuando las posibilidades de suministro de los recursos eólicos y solares es mayor. Podríase, pues, atender incluso la mitad de la demanda máxima y un tercio de la energía eléctrica total con viento y fuentes solares añadiendo sólo una modesta capacidad de almacenamiento [*véase la figura 8*].

Aun así, la energía solar directa y la eólica podrían aportar una mayor contribución si se dispusiera de mayores medios de almacenamiento. De ahí el interés en perfeccionar las técnicas de almacenamiento a la par que las técnicas de generación de energía solar. Los sistemas solares térmicos se adaptan fácilmente al almacenamiento térmico a alta temperatura. Las ventajas económicas de éste superan, hoy, las de baterías u otro almacenamiento no térmico, especialmente cuando el fluido que transporta el calor desde el colector es, al mismo tiempo, el medio de almacenamiento de calor. El almacenamiento térmico permite que una planta solar térmica proporcione energía al modo de una central térmica de combustible fósil de carga constante. Muchos estudios abonan la rentabilidad de los sistemas solares térmicos con receptor central y almacenamiento térmico, frente a los sistemas de combustible fósil.

Hay otro método: añadir un sistema de combustible fósil de bajo coste cuya producción se ajuste fácilmente para compensar las variaciones del suministro solar. Un "híbrido" solar-gas natural, en particular, sería una de las maneras más benignas, desde el punto de vista ecológico, de usar combustible fósil para generar energía.

A un coste añadido muy bajo, la empresa LUZ agregó una instalación para quemar gas natural a su sistema solar térmico. La fuente de calor suplementaria de gas natural le proporcionó la capacidad de maximizar el valor de la producción de su instalación, garantizando el suministro de energía cuando se necesitara.

El concepto del híbrido solar-gas natural es también aplicable a las eólicas y fotovoltaicas. Podría emplearse en esos híbridos una nueva generación de turbinas de gas baratas y de alto rendimiento. Aunque el coste adicional sería más alto que el del quemador de gas del híbrido de la LUZ, las turbinas de gas vendrían a valer un tercio de lo que valen los sistemas térmicos de carbón.

Las pequeñas instalaciones híbridas que conjugan FV, baterías y generadores diesel proporcionan ya un suministro fiable de energía en algunos lugares apartados. Un minisistema de esta clase abastece a unas 100 perso-

nas en la Isla de Cocos, en el estrecho de Torres (entre Australia y Nueva Guinea). Hay en estudio un sistema similar para Africa 1000, proyecto que suministraría electricidad a 1000 poblados, y para la parte despoblada de Australia.

Algunas de las opciones que brinda la energía solar gozan de un sistema de almacenamiento intrínseco. En la biomasa —materia verde de las plantas creada por la fotosíntesis— la energía solar se almacena en forma de energía química que se recupera quemando las plantas.

La biomasa ofrece cierto número de ventajas. A diferencia de los combustibles fósiles, la biomasa se puede obtener en buena parte de la superficie terrestre. Generalmente contiene menos del 0,1 por ciento de azufre y deja entre el 3 y el 5 por ciento de cenizas, en comparación con el 2 o 3 por ciento y del 10 al 15 por ciento, respectivamente, de los carbones bituminosos. Si la biomasa se produjera a un ritmo viable, el dióxido de carbono liberado cuando se procesa y se quema queda contrarrestado exactamente con el dióxido de carbono consumido durante la fotosíntesis. La bioenergía no aportaría una contribución neta al dióxido de carbono de la atmósfera y, por tanto, no fomentaría el calentamiento global.

Conocido es el uso generalizado de biomasa para producir electricidad y calor en el sector maderero. Los restos de madera del proceso de producción sirven de combustible para sistemas cogeneradores de turbinas de vapor. Esta práctica es económica solamente donde se disponga del combustible de biomasa a bajo precio. Las turbinas de vapor, bastante caras, ofrecen bajo rendimiento a las modestas escalas que son adecuadas para la biomasa (menos de 100 megawatt). A mayores escalas, los costes de transporte se hacen prohibitivos, porque los recursos de biomasa están dispersos por grandes superficies.

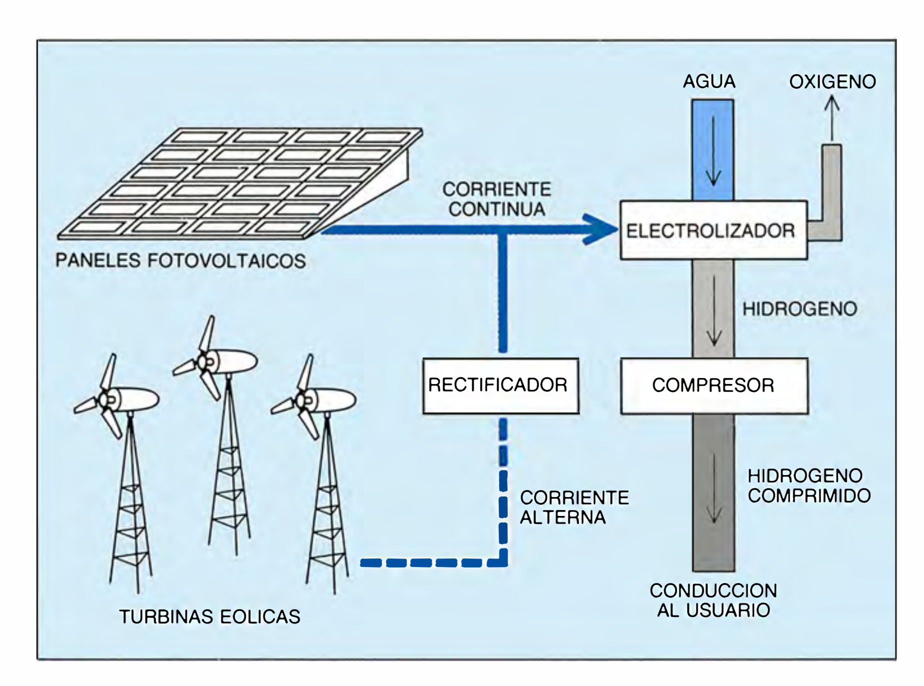
La turbina de gas constituye un medio prometedor de generar rentablemente energía a partir de la biomasa, aunque se empleen combustibles más costosos: restos de troncos o de plantas cultivadas en los campos. En las turbinas de gas, se quema combustible gaseoso y los productos de combustión a alta temperatura se llevan a una turbina que genera electricidad. Además, los gases calientes que se liberan de la turbina sirven para producir vapor, apto a su vez para aplicaciones industriales o generación adicional de energía. Las turbinas de gas son de por sí más baratas y sencillas que las turbinas de vapor convencionales. Y mientras que el rendimiento de éstas no ha mejorado desde fines del decenio de 1950, las turbinas de gas han progresado sin cesar.

El método que ofrece mejores perspectivas en el uso de biomasa en turbinas de gas es el de gasificarla con aire y vapor a alta presión y limpiar el gas de las impurezas que podrían dañar los álabes de la turbina antes de quemarlo. La gasificación y la generación de energía se habrían de realizar en la misma instalación, lo que facilitaría el máximo rendimiento. La técnica integrada gasificador-turbina de gas, que se está desarrollando para el carbón, podría adaptarse sin problemas a la biomasa. Más, la técnica podría probablemente comercializarse antes y a menor precio para la biomasa que para el carbón, porque aquélla se gasifica mejor y no suele contener mucho azufre. De acuerdo con las estimaciones provisionales realizadas por uno de los autores y sus colaboradores, de la Universidad de Princeton, el sistema gasificador de biomasa-turbina de gas podría resultar ventajosa frente a las centrales térmicas de carbón, nucleares o hidroeléctricas, lo mismo en países industrializados que en vías de desarrollo.

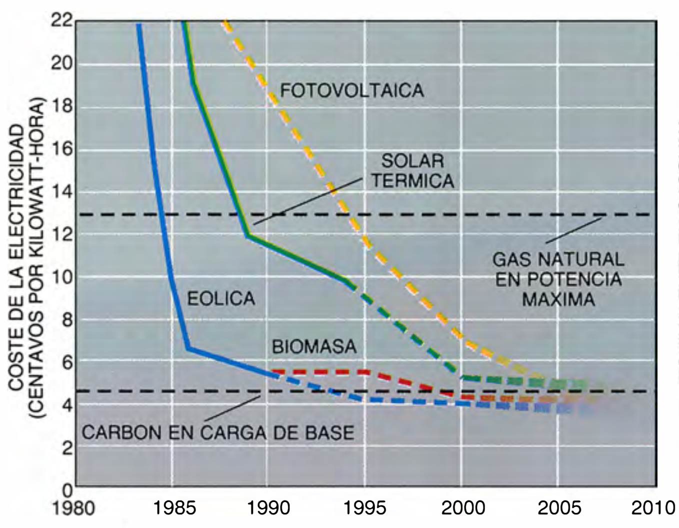
Las mejores perspectivas de aplicación a corto plazo de las turbinas de gas alimentadas con biomasa se dan en las industrias que producen grandes cantidades de residuos de biomasa: ingenios azucareros y destilerías. Las turbinas de gas alimentadas con residuos de caña de azúcar podrían generar mucha más electricidad de la que necesitan los ingenios o las destilerías. En las destilerías brasileñas, los beneficios económicos de la coproducción de electricidad podrían hacer que el alcohol fuera competitivo con el petróleo, aun cuando el precio de éste fuera barato. Con la producción actual de caña, los sistemas gasificador-turbina de gas podrían producir hasta la mitad de la energía total ahora generada —sea cual fuere la fuente— en los 80 países en vías de desarrollo que producen caña.

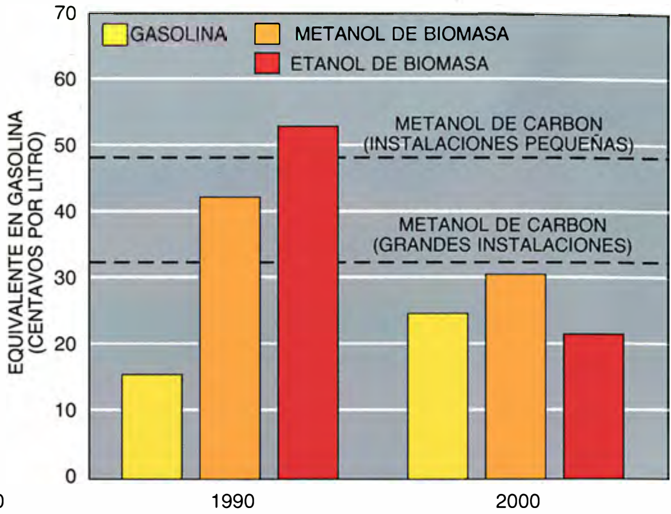
Aunque la producción de electricidad predominará, a buen seguro, entre las aplicaciones iniciales de la energía solar, la producción de combustibles líquidos y gaseosos será también importante en el siglo XXI. El interés por los combustibles sintéticos conoció un breve esplendor durante el decenio de 1970, decayó con el descenso de los precios del petróleo en el de 1980 y ha renacido, esta vez impulsado sobre todo por preocupaciones ecológicas.

El metanol es un combustible sustitutivo para el transporte que ha despertado gran interés. Aunque crearía menos contaminación atmosférica local que la gasolina, la adopción del metanol obtenido a partir de combustibles fósiles plantea riesgos climáticos. En un principio se obtendría quizá del gas natural, pero a medida que las reservas de éste comenzaran a escasear los fabricantes podrían recurrir al carbón como materia



6. EL HIDROGENO producido disociando el agua con energía fotovoltaica o eólica es un combustible limpio que almacena la energía en forma química. El transporte de hidrógeno resulta, en principio, más barato que el de la electricidad; en virtud de ello, el empleo del hidrógeno constituye un atractivo método de transportar la energía solar hasta los principales centros de su demanda.





7. COSTES DE LA ELECTRICIDAD SOLAR y su caída vertiginosa desde el decenio de 1980, gracias a los progresos de la técnica y a una mayor experiencia. Los costes de la electricidad (*izquierda*) se basan en los costes actuales (*trazo continuo*) o estimados para el futuro (*discontinuo*) de la producción de energía en gran escala. Se muestran también los costes para las nuevas centrales de carbón de carga de base y de gas natural para demanda máxima. El metanol obtenido de la biomasa costaría más que el metanol producido en grandes instalaciones a partir del carbón, pero si éstas fuesen del mismo tamaño que las de biomasa, el metanol de las últimas sería más barato. El etanol extraído de la madera podría competir con la gasolina.

prima, mucho más abundante. Si el metanol se extrajera del carbón, aumentaría el calentamiento global, porque desprende a la atmósfera doble cantidad de dióxido de carbono que la gasolina.

Ese inconveniente podría evitarse usando metanol producido a partir de biomasa leñosa que se puede cultivar de manera sostenida. La biomasa se gasificaría y sintetizaría en metanol mediante procesos similares a los que se están desarrollando para el carbón. El metanol procedente de carbón costaría menos si, tal como se ve hoy, las instalaciones empleadas fueran grandes unidades que importaran mil millones de dólares o más. No obstante, la tendencia en la conversión de energía camina hacia unidades más pequeñas, más modulares y de menor riesgo financiero. En las escalas mucho menores que impone la biomasa, el metanol obtenido de ésta sería más barato que el extraído del carbón.

Una opción alternativa al metanol la representa el etanol producido por la fermentación de azúcares obtenidos de la biomasa. Brasil fabrica etanol de caña de azúcar en cantidades industriales; EE.UU. usa modestas cantidades de etanol procedente del maíz como suplemento de la gasolina. El etanol obtenido del maíz es bastante caro, porque lo es el cultivo de esa planta; pero se están desarrollando técnicas para elaborar, mediante enzimas, azúcares fermentables a partir de restos leñosos. El Instituto de Investigación de Energía Solar de Golden (Colorado) estima que, para el año 2000, el etanol procedente de fuentes tan baratas podría competir con la gasolina.

La producción total de biomasa quedará en último término condicionada por el agua y suelo disponibles, debido al bajo rendimiento de la fotosíntesis y a las grandes exigencias hídricas de las plantas. No obstante, la biomasa puede ocupar un lugar en la economía energética si se busca un mayor rendimiento energético. En los EE.UU., las posibilidades de abastecimiento de biomasa podrían reemplazar todo el petróleo que consumen hoy los vehículos ligeros y el carbón empleado para producir electricidad, siempre y cuando el consumo de carburante de los vehículos se redujera a la mitad y se usen, para producir energía, unidades gasificador-turbina de gas de alto rendimiento. De hacerse así, las emisiones nacionales de dióxido de carbono bajarían a la mitad [*véase la figura 5*].

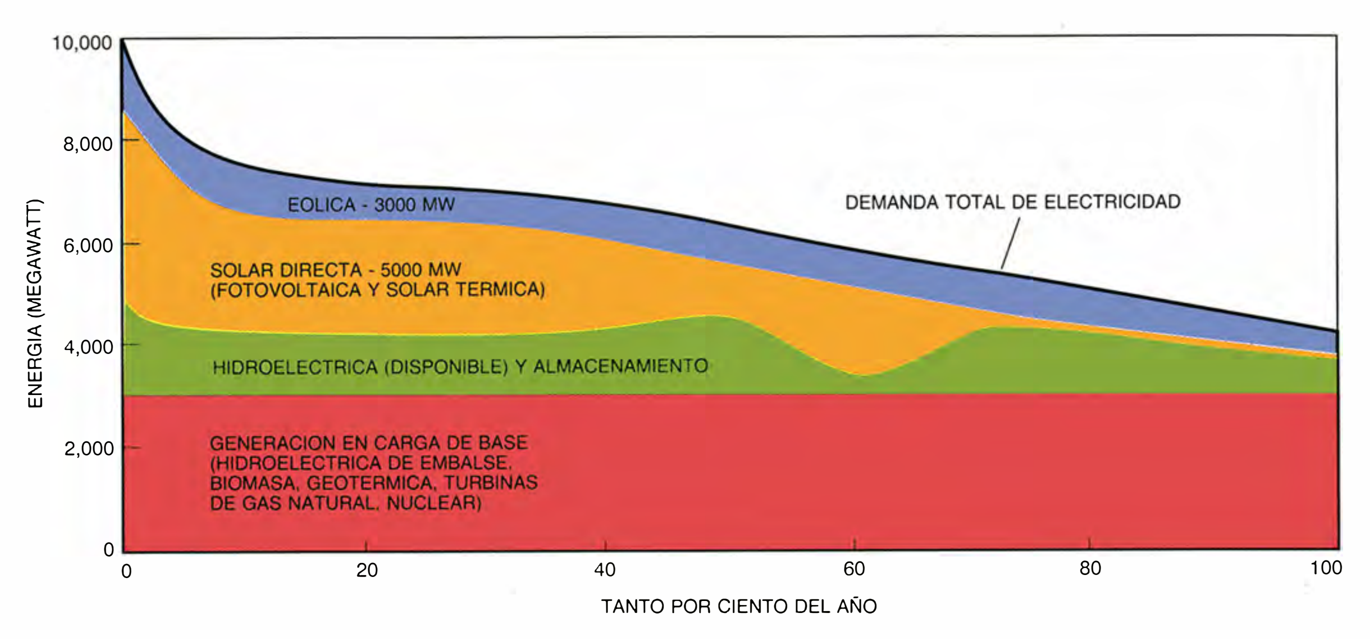
El hidrógeno producido por electrólisis, usando la energía solar para disociar el agua en sus dos elementos constituyentes, es un combustible limpio, apto para el transporte y la calefacción; con el tiempo podría servir también para producir electricidad (y calor como subproducto) en quemadores de combustible de alto rendimiento.

La conversión en hidrógeno proporciona un medio ventajoso de almacenar la intermitente energía solar. Teniendo en cuenta, además, que cuesta menos (en principio y sobre la base de la vida útil) transportar hidrógeno por tuberías que transmitir electricidad por cables, las instalaciones de producción de hidrógeno se pueden colocar allí donde la producción sea más barata, aun cuando tales lugares queden lejos de los puntos de uso del hidrógeno.

Los progresos que se operen en la técnica solar a lo largo de los próximos dos decenios habrán de poner a nuestro alcance la producción de hidrógeno electrolítico a partir de esas fuentes y a un coste para el consumidor aproximadamente doble del actual precio de la gasolina en los EE.UU., en equivalentes de energía. Cifras que caen bastante por debajo de los precios a los que se vende la gasolina en Europa y Japón, con altos impuestos sobre la misma.

Comparado con los combustibles fósiles, les lleva en ventaja su casi inocuidad para el medio ambiente. Cuando el hidrógeno se quema, se convierte en agua. No produce monóxido de carbono, dióxido de carbono, dióxido de azufre o hidrocarburos, ni deja materia particulada. Los únicos contaminantes son óxidos de nitrógeno, que pueden reducirse a niveles muy bajos.

El hidrógeno solar constituirá también un combustible atractivo donde y cuando la escasez de suelo y agua limiten las posibilidades de los combustibles procedentes de la biomasa. A modo de botón de muestra, la cantidad de hidrógeno FV equivalente al consumo total de combustibles fósiles en el mundo se podría producir en 500.000 kilómetros cuadrados, menos del dos por ciento de la superficie desértica del globo. De hecho, los desiertos tórridos son emplazamientos prometedores para la producción de hidrógeno, habida cuenta de la exigua cuantía de agua que se requiere en la electrólisis: para el hidrógeno FV, equivale a sólo dos o tres centíme-



8. FUENTES SOLARES y su notable aportación al suministro de electricidad, ilustradas para una hipotética empresa de California. Cada punto de la curva superior muestra el porcentaje de tiempo en que la demanda de la compañía excede el valor indicado. El 1 por ciento del tiempo (88 horas anuales) en que la carga excede el 90 por ciento de la demanda máxima representa el 90 por ciento de la probabilidad anual de que la empresa no pueda satisfacer su carga por culpa de las averías del sistema. La contribución solar durante esas horas reviste especial valor. Aquí el viento y la energía solar directa, con una modesta cantidad de almacenamiento, pueden satisfacer la mitad de la demanda máxima y un tercio de la energía eléctrica total. Las fuentes hidroeléctrica y de biomasa podrían incrementar la contribución solar. El bache de la curva de energía hidroeléctrica (*verde*) es consecuencia de la disponibilidad de energía solar en los fines de semana, cuando la demanda es baja. La energía excedente se almacenaría.

tros de precipitaciones al año. El hidrógeno procedente de energía solar brinda a este recurso un papel más destacado en la producción de combustible de lo que es posible con la biomasa por sí sola.

Las técnicas solares avanzan a grandes pasos y los augurios para el futuro son optimistas. La política necesaria para promover el desarrollo a gran escala de la energía solar variará de una parte del mundo a otra. Podemos, sin embargo, esbozar algunas líneas generales de lo que han de ser esas actuaciones.

El aprovechamiento de la energía añadirá nuevos atractivos a la energía solar, pues permitirá obtener más servicios útiles de las fuentes solares y reducir el capital necesario para su suministro. Por tanto, la promoción del uso eficaz de la energía debe reputarse elemento clave de la política energética solar.

Las reglas de la actual economía energética se establecieron para favorecer los sistemas existentes. No es sorprendente, pues, que las reglas se muestren reticentes ante la energía solar. Uno de los mayores obstáculos para quienes elaboran la política energética es superar esas prevenciones.

Prejuicios que se manifiestan en los impuestos y subsidios; estimulan la explotación de combustibles fósiles y favorecen los costes de funcionamiento por encima de las inversiones a largo plazo. Habría que eliminar tal sesgo y, si ello no es políticamente factible, el sistema de impuestos y subsidios debería estar más equilibrado por lo menos.

Prejuicios que se reflejan, también, en los actuales precios de la energía. No recogen, en general, muchos de los costes sociales externos de la producción y uso de la energía; verbigracia, peligros de la contaminación atmosférica, riesgo nuclear y coste económico, ecológico y sanitario del cambio climático global. Tales costes tienden a ser más bajos para las fuentes solares. Las políticas que los tomen en consideración harán más competitiva la energía solar.

Pese al espectacular progreso de los últimos diez años en el desarrollo de las técnicas de energía solar y la reducción de sus costes, la mayoría no puede todavía competir con la energía convencional sobre la base del coste directo. Se necesita más investigación y desarrollo, aunque el simple aumento de los presupuestos en ese capítulo no es suficiente. Una importante lección del último decenio estriba en lo siguiente: la tecnología creada en el laboratorio y transferida directamente a una empresa comercial no garantiza la aceptación del mercado. Mejor resulta promover la cooperación entre los investigadores, los fabricantes y los usuarios potenciales en consorcios o cooperativas, acelerando el aprendizaje en el laboratorio, la fábrica y el campo.

La ayuda gubernamental debería dirigirse a la ciencia básica y aplicada, y a los aspectos técnicos de importancia general; debería fomentar la capacidad industrial de desarrollo, instalación y operación de los sistemas de energía solar. Habría que ordenar los proyectos de desarrollo hacia la promoción de técnicas de interés y consolidación de la estructura industrial, con costes compartidos por el gobierno, los empresarios y los usuarios potenciales.

Uno de los mayores retos radica, en efecto, en la creación de una infraestructura industrial para la energía solar. Las opciones más apropiadas variarán con la técnica a emplear y la región. La espectacular reducción de costes de las energías eólica y solar térmica en California fueron resultado de una política de impuestos favorable y de conciertos de compra de energía establecidos por el estado. Tales políticas generaron un flujo de ingresos que financió la mejora de los productos y el aprendizaje organizativo, haciendo que los costes bajasen.

Cuando se emplean incentivos para fomentar nuevas técnicas surge siempre la cuestión de su rentabilidad económica. Ahora bien, mientras los incentivos se elaboren para reflejar los costes sociales externos no incluidos en los precios del mercado, ofrecerán un sistema adecuado para fomentar el desarrollo de la industria solar.

Cabe también potenciar segmentos

de mercado de alto valor antes de introducirse en el mercado general de la energía. La industria de la energía solar, bastante modesta, se muestra vacilante a la hora de ampliar la capacidad de producción sin garantías de que el mercado crecerá. Las empresas eléctricas y los gobiernos podrían colaborar delimitando los segmentos de mercado y adquiriendo sistemas de energía solar para su aplicación en instalaciones de su competencia.

En algunos casos, las barreras que se oponen al desarrollo del mercado son más institucionales que económicas. Hay importantes mercados de cogeneración mediante la biomasa que pueden explotarse de forma rentable a corto plazo usando residuos baratos de biomasa procedentes de actividades industriales (fábricas de pulpa, papel y caña de azúcar). Pero en muchas partes del mundo resulta difícil crear tales mercados porque las empresas eléctricas no están dispuestas a adquirir el exceso de electricidad o a ofrecer la energía suplementaria a precios justos.

Una última vertiente de las medidas políticas se refiere a las estructuras industriales de energía solar. La naturaleza de la técnica y recursos solares implica que, aunque las industrias de ese sector adquieran probablemente características estructurales muy diferentes de las que poseen las industrias energéticas existentes, éstas encierran posibilidades únicas para ayudar a la energía solar a alcanzar todo su potencial.

Dada la naturaleza modular de las técnicas solares, las compañías que producen esos equipos deberían seguir el modelo de empresas prósperas de otros sectores que ofrecen artículos en cuya manufactura se emplean técnicas de producción en masa a bajo coste, y preocuparse menos por los métodos de las dedicadas a las técnicas de producción de energía en gran escala. La diversidad de los suministros solares, en tamaño y técnica, plantea también importantes dificultades para la gestión habitual del suministro de energía.

Considérense las empresas eléctricas. Producen la energía en instalaciones centralizadas y la envían a sus clientes por medio de grandes redes de transmisión y distribución. El actual sistema está edificado en torno a los conceptos de centralización y posibilidad de interconexión, mientras que los sistemas solares adquieren su máximo valor en sistemas dispersos, conectados a la red o aislados. No obstante, la empresa eléctrica es la institución lógica para la gestión de la electricidad solar.

En lo concerniente a los sistemas de energía solar, los suministros deberán organizarse de manera fiable y rentable, aporten el fluido las grandes compañías, empresarios autónomos o ambos. Incluso para los sistemas aislados, las empresas eléctricas pueden tener su relevancia. En muchos países, la instalación de tales sistemas corre a cargo de grupos distintos de las empresas eléctricas, en virtud de la tesis, compartida por empresas y gobiernos, de que las compañías deben limitarse a la "electricidad por cable". No obstante, las empresas deberían también ofrecer la opción de electricidad sin cable, porque su experiencia es inapreciable en la vigilancia, mantenimiento y servicios generales de manera continuada.

La incorporación satisfactoria de las empresas eléctricas en la gestión de la energía solar requiere una modificación de sus estructuras básicas. Su tarea será más difícil debido a la diversidad y variabilidad de las fuentes de energía solar, habiendo de afrontar además el reto de aplicarse a las técnicas de almacenamiento y reorganizar las fuentes convencionales para complementar las fuentes solares de la manera más eficaz posible. Las empresas han de conceder menos importancia a la centralización e interconexión derivadas de la economía de escala y más a su capacidad para descender al dominio en que se aplican los recursos solares.

La experiencia del decenio de los ochenta nos enseña que la actitud de los poderes públicos puede acelerar la aceptación de la energía solar en el mercado. La elaboración de políticas eficaces para promover la transición hacia la energía solar es una estrategia importante y responsable para salir al paso de las crecientes preocupaciones ambientales.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

WIND ENERGY GROUP TECHNICAL PAPERS, 1982-1989. Department of Research and Development, Pacific Gas & Electric Company. Report 007.1-89.2, 28 de noviembre de 1989.

SOLAR HYDROGEN: MOVING BEYOND FOSSIL FUELS. Joan M. Ogden y Robert H. Williams. World Resources Institute, 1989.

THE POTENTIAL OF RENEWABLE ENERGY. Interlaboratory White Paper, SERI/TP-260-3674. Instituto para la Investigación de la Energía Solar, marzo de 1990.

HARNESSING SOLAR POWER: THE PV CHALLENGE. Ken Zweibel. Plenum Press, 1990.


PUB

La energía en transición

Está llegando a su fin la época de fuentes de energía baratas y cómodas. Importa ahora gestionar la transición hacia fuentes más caras, aunque menos contaminantes

John P. Holdren

Como los anteriores artículos dejan bien claro, a la civilización no se le están agotando los recursos energéticos en un sentido absoluto, ni se le están acabando las opciones técnicas para transformar estos recursos en las formas particulares que nuestras pautas de uso de energía requieren. Pero nos estamos quedando sin el petróleo y el gas natural baratos que impulsaron gran parte del crecimiento de la sociedad industrial moderna, sin la capacidad ambiental para absorber los impactos de la combustión del carbón y sin la aceptación pública de los riesgos que rodean la fisión nuclear. Parece, asimismo, que nos faltan la voluntad de hacer más limpio el carbón y más segura la fisión, el dinero y la paciencia necesarios para desarrollar vías alternativas a largo plazo, la astucia para aprovechar mejor la energía a la escala exigida y el consenso para conformar cualquier estrategia coherente.

Estas limitaciones sugieren que la civilización ha entrado en una fase de transición fundamental en la naturaleza de la interacción energía-sociedad, sin que la gente sea consciente del carácter de la transición o de sus implicaciones para el bienestar humano. Esta transición va de una situación de recursos energéticos convenientes aunque escasos por excelencia hacia otra situación de recursos menos domeñables pero más abundantes; es también transición de una conexión directa y positiva entre la energía y el bienestar económico hacia otra complicada y multidimensional, y de bolsas localizadas de contaminación y riesgo a impactos que son de alcance regional e incluso global.

El propio tema es objeto de transformación. Su interés político restringido al ámbito de las naciones se ha convertido en foco de grandes debates políticos entre ellas; lo que era asunto dominado por las decisiones y los intereses del mundo occidental ha pasado a ser asunto en el que los problemas y las expectativas de todas las regiones se hallan inextricablemente conectados y la cuesión que concernía a un pequeño grupo de técnicos y funcionarios es hoy cuestión en la que cuentan los valores y las acciones de cada ciudadano.

Para entender esta transición hemos de repasar la conexión de doble sentido entre energía y bienestar humano. La energía contribuye al bienestar, al proporcionar al usuario calefacción, iluminación y cocina, amén de servir como entrada necesaria para la producción económica. Pero los costos de la energía (incluyendo no sólo el dinero y otros recursos dedicados a extraerla y explotarla, sino también los impactos ambientales y sociopolíticos) dificultan el bienestar.

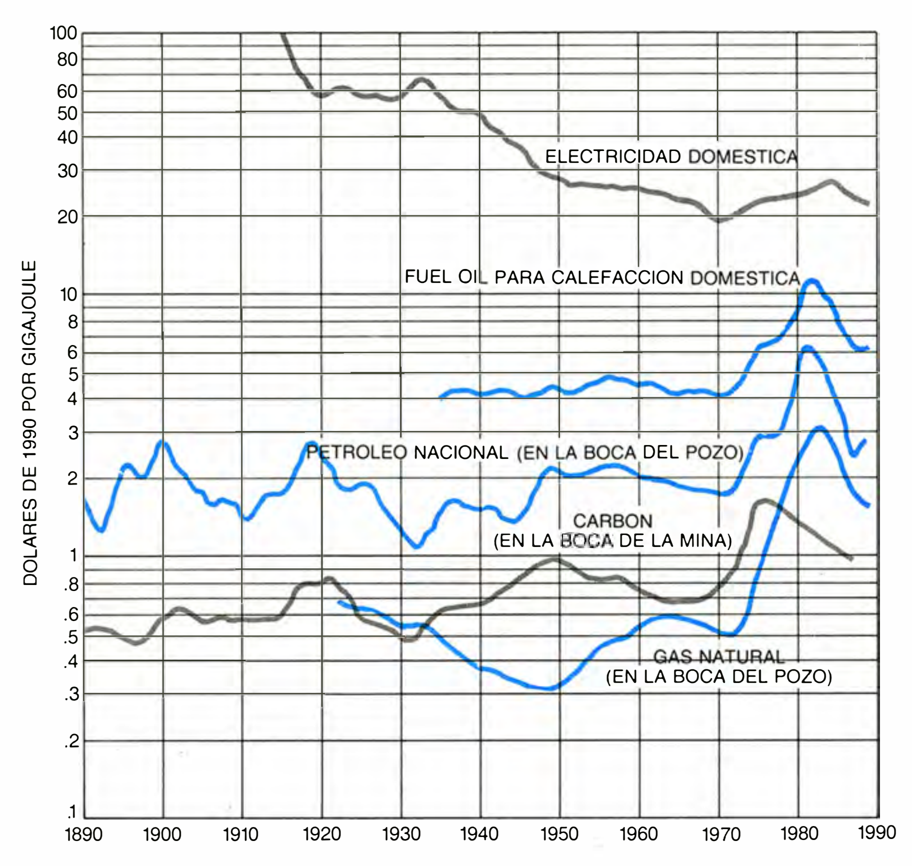
Durante la mayor parte de la historia humana, las inquietudes dominantes sobre la energía se han centrado en el lado de los beneficios de la ecuación energía-bienestar. La falta de adecuación de los recursos energéticos o (más frecuentemente) de las técnicas y organizaciones para recuperar, convertir y distribuir dichos recursos, ha supuesto insuficientes beneficios energéticos y, por ello, obstáculos, carencias y limitaciones para el desarrollo. Los problemas energéticos de esta categoría siguen siendo la preocupación principal de los países menos desarrollados, donde el tema fundamental es el de la energía para las necesidades básicas; constituyen también una inquietud importante en los países intermedios y los recién industrializados, donde el tema es la energía para la producción y el crecimiento.

Dejando aparte la carencia extrema de energía, se puede sufrir por pagarla muy cara. El precio puede implicar una excesiva desviación de capital, trabajo e ingresos procedentes de necesidades no energéticas (con lo que se produce inflación y cae el nivel de vida), o arrostrar excesivos impactos ambientales y sociopolíticos. Sin embargo, durante la mayor parte de los últimos cien años, los problemas relativos a un coste gravoso se han reputado menos amenazadores que los problemas de suministro insuficiente. Entre 1890 y 1970, los costes monetarios del suministro y los precios pagados por los usuarios se mantuvieron más o menos constantes o se redujeron; los costes ambientales y sociopolíticos se consideraron, por contra, problemas locales o inconveniencias temporales, sin generalizar la responsabilidad ni atender a su persistencia.

Ese panorama cambió en los años setenta. Las conmociones en el precio del petróleo de 1973-74 y 1979 duplicaron y, después, cuadruplicaron el precio real del crudo en el mercado mundial. En 1973, el petróleo constituía aproximadamente la mitad del uso anual mundial de formas de energía industrial (petróleo, gas natural, carbón, energía nuclear y energía hidroeléctrica, en oposición a las formas de energía tradicional: leña, de-

1. FERIA CALLEJERA en Nueva York; reúne a un gran número de personas procedentes de un segmento de alta tecnología de una población mundial cifrada en 5300 millones. Si el resto de la población mundial utilizara la energía a la misma tasa que lo hacen los ciudadanos de los Estados Unidos, el uso global de la energía en 1990 cuadruplicaría, de lejos, el consumo actual.

JOHN P. HOLDREN es profesor de energía y recursos en la Universidad de California en Berkeley. Comenzó su formación en el Instituto de Tecnología de Massachusetts y se doctoró en física del plasma por la Universidad de Stanford. Además de su labor en Berkeley, es presidente del comité ejecutivo de las Conferencias Pugwash sobre Ciencia y Asuntos Mundiales.



2. COSTES DE LA ENERGIA en los Estados Unidos a lo largo del último siglo, en dólares constantes. Las conmociones de los años setenta en el precio de los combustibles fueron provocadas por la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP), pero reflejan una realidad subyacente: el petróleo y el gas natural baratos (fácilmente recuperables) ya han desaparecido en la mayor parte del mundo. Aunque la sustitución y la conservación de combustible hicieron que los precios del petróleo de la OPEP bajaran a principios de los ochenta, no es probable que los precios vuelvan a alcanzar los valores anteriores a la conmoción de los setenta. La electricidad resultó menos afectada por las alteraciones de los precios, debido al limitado papel del petróleo en la generación de electricidad y a la modesta contribución de los costes del combustible al precio total de dicha generación.

sechos agrícolas y estiércol). Inevitablemente, la subida de los precios del petróleo acarreó el aumento de los precios de las demás formas de energía industrial. Los resultados ilustran los peligros del coste monetario desmesurado de la energía: recesión mundial, deuda creciente, un golpe de castigo a las perspectivas de desarrollo de los países pobres en petróleo del hemisferio sur y la imposición por parte de las naciones industrializadas de cargas económicas gravosas para las pobres.

Los primeros años de la década de los setenta marcaron, asimismo, una transición al abordar los costes ambientales y sociopolíticos de la energía. Los problemas de la contaminación del aire y del agua, muchos de ellos asociados al suministro y al uso de la energía, empezaron a reconocerse como amenazas para la salud, el bienestar económico y la estabilidad ambiental. La conciencia de los costes sociopolíticos de la energía se avivó cuando la excesiva dependencia del petróleo del Oriente Medio creó tensiones de política exterior e incluso condiciones prebélicas y, cuando la India hizo estallar su bomba nuclear en 1974, se puso de manifiesto que la creciente competencia en energía nuclear podría proporcionar tanto armas como electricidad.

Así pues, la década de los setenta fue un momento crítico. Después de décadas de permanencia o de reducción en los costes monetarios (y de relegación de los costes ambientales y sociopolíticos a un segundo término), se vio que la energía se hacía cara en todos los sentidos. Empezó a ser plausible que los desmesurados costes energéticos plantearan amenazas lo mismo que las del suministro insuficiente. Y se comenzó a pensar que la expansión de algunas formas de suministro podría crear costes que superaran los beneficios.

La cuestión crucial, a principios de la década de los noventa, es la de si la tendencia que se inició en la de los setenta resultará temporal o permanente. (Dejando entre paréntesis la crisis del golfo Pérsico abierta en agosto de 1990.) ¿Ha terminado la época de la energía barata, o bien una combinación de nuevos recursos, nuevas técnicas y una geopolítica cambiante la volverá a traer? Un factor clave de la respuesta es la desconcertante escala de demanda energética producida por 100 años de crecimiento demográfico sin precedentes, unido a un crecimiento igualmente notable en la demanda *per capita* de formas de energía industrial. Suministrar energía a tasas del orden de los 10 terawatt (un terawatt son mil millones de watt), lo que se consiguió por vez primera a finales de los sesenta, es una empresa de una escala formidable. La manera como se hizo en 1970 requirió la extracción, procesado y combustión de unos tres mil millones de toneladas de hulla y lignito, unos 17.000 millones de barriles de petróleo, más de un billón de metros cúbicos de gas natural y unos dos mil millones de metros cúbicos de leña. Supuso el empleo de carbón en bruto y carbón limpio, petróleo submarino y terrestre, gas profundo y superficial, emplazamientos hidroeléctricos mediocres y buenos, y deforestación y recolección viable de leña.

El crecimiento de formas de energía industrial de los últimos cien años debióse, en buena parte, al petróleo y el gas natural, los combustibles químicos más accesibles, versátiles, transportables y baratos del planeta. El consumo acumulado, en ese lapso, de unos 200 terawatt-año de petróleo y gas, representa quizás el 20 por ciento de la fracción eventualmente recuperable de la reserva existente de estos combustibles. Si el consumo acumulado de petróleo y gas continúa duplicándose cada 15 a 20 años, como lo ha hecho durante un siglo, las reservas iniciales se habrán agotado en un 80 por ciento de aquí a 30 o 40 años.

Con excepción de los enormes depósitos de petróleo que se hallan en Oriente Medio, el petróleo y el gas más baratos ya han desaparecido. Las tendencias que antaño mantenían los costes a raya frente al agotamiento acumulativo, es decir, los nuevos pozos y las economías de escala en la elaboración y el transporte, se han terminado. Aun cuando se descubran unos cuantos yacimientos petrolíferos gigantes más, no va a cambiar mucho el consumo actual. Para la mayoría de los países, el petróleo y el gas procederán, cada vez más, de yacimientos petrolíferos menores y dispersos, de zonas litorales y árticas, de mayores profundidades en el subsuelo y de importaciones cuya seguridad y viabilidad no se garantizan.

Hay recursos energéticos más abundantes que el petróleo y el gas;

los más importantes: carbón, energía solar y combustibles fisionables y fusionables. Pero todos ellos exigen su transformación, complicada y cara, en electricidad o en combustibles líquidos para satisfacer las necesidades de la sociedad. Ninguno de ellos ofrece perspectivas fundadas de que aporten grandes cantidades de electricidad a costes comparables con los de las baratas centrales térmicas e hidroeléctricas de los años sesenta. Parece, pues, que la energía cara es condición permanente, al margen incluso de su coste ambiental.

La capacidad que posee el ambiente de absorber los efluentes y otros impactos de las técnicas energéticas es, en sí misma, un recurso finito. La limitación se manifiesta en dos tipos básicos de costes ambientales: externos e internos. Los costes "externos", impuestos por las perturbaciones ambientales que inciden en la sociedad, no se reflejan en las cuentas monetarias de usuarios y vendedores de energía. Los costes "internos" son aumentos en el coste monetario y vienen impuestos por medidas (verbigracia, dispositivos de control de la contaminación) destinadas a mitigar los costes externos.

Ambos tipos de costes han estado subiendo por varias razones. En primer lugar, la calidad decreciente de los depósitos de combustible y de los emplazamientos de conversión de energía a los que la sociedad debe ahora acudir significa que hay que trasladar o elaborar más material, construir mayores instalaciones y atravesar distancias más largas. En segundo lugar, la magnitud creciente de las emisiones ha conducido a la saturación de la capacidad del ambiente para absorber tales efluentes.

En tercer lugar, el coste monetario que supone el control de la contaminación tiende a aumentar con la cuantía de contaminante que se ahorra. La combinación de mayores tasas de uso de energía, menor calidad de los recursos y un ambiente sometido a tensión exige que se vaya ahorrando una cuantía creciente si se quiere mantener fijos, por los menos, los daños inevitables. En consecuencia, los costes internos tienen que subir. Y, en cuarto lugar, la creciente preocupación pública y política por el entorno ha alargado el tiempo requerido para buscar el emplazamiento, construir y autorizar las instalaciones relacionadas con la energía, y ha provocado el cambio frecuente, en pleno proyecto,

CANTIDAD AFECTADA	NIVEL DE REFERENCIA NATURAL	INDICE DE PERTURBACION ANTROPICA	PROPORCION DE LA PERTURBACION ANTROPICA PRODUCIDA POR:			
			ENERGIA INDUSTRIAL	ENERGIA TRADICIONAL	AGRICULTURA	MANUFACTURA, OTROS
FLUJO DE PLOMO	25.000 TONELADAS/AÑO	15	63% COMBUSTION DE COMBUSTIBLE FOSIL, INCLUYENDO ADITIVOS	PEQUEÑA	PEQUEÑA	37% ELABORACION DE METALES, MANUFACTURA, COMBUSTION DE DESPERDICIOS
FLUJO DE PETROLEO A LOS OCEANOS	500.000 TONELADAS/AÑO	10	60% PRODUCCION, ELABORACION Y TRANSPORTE DE PETROLEO	PEQUEÑA	PEQUEÑA	40% ELIMINACION DE RESIDUOS DE PETROLEO
FLUJO DE CADMIO	1000 TONELADAS/AÑO	8	13% FUNDICION, COMBUSTION DE DESPERDICIOS	5% COMBUSTION DE COMBUSTIBLES TRADICIONALES	12% COMBUSTION AGRICOLA	70% ELABORACION DE METALES, MANUFACTURA, COMBUSTION DE DESPERDICIOS
FLUJO DE SO_2	50 MILLONES DE TONELADAS AÑO	1.4	85% COMBUSTION DE COMBUSTIBLES FOSILES	0,5% COMBUSTION DE COMBUSTIBLES TRADICIONALES	1% COMBUSTION AGRICOLA	13% COMBUSTION DE COMBUSTIBLES FOSILES
EXISTENCIAS DE METANO	0,8 PARTES POR MILLON	1.1	18% PRODUCCION Y ELABORACION DE COMBUSTIBLES FOSILES	5% COMBUSTION DE COMBUSTIBLES TRADICIONALES	65% ARROZALES, ANIMALES DOMESTICOS, DESBROCE DE TIERRAS	12% TERRAPLENES
FLUJO DE MERCURIO	25.000 TONELADAS/AÑO	.7	20% COMBUSTION DE COMBUSTIBLES FOSILES	1% COMBUSTION DE COMBUSTIBLES TRADICIONALES	2% COMBUSTION AGRICOLA	77% ELABORACION DE METALES, MANUFACTURA, COMBUSTION DE DESPERDICIOS
FLUJO DE OXIDO NITROSO	10 MILLONES DE TONELADAS/AÑO	.4	12% COMBUSTION DE COMBUSTIBLES FOSILES	8% COMBUSTION DE COMBUSTIBLES TRADICIONALES	80% FERTILIZANTES, DESBROCE DE TIERRAS, DESORGANIZACION DE ACUIFEROS	PEQUEÑA
FLUJO DE PARTICULAS	500 MILLONES DE TONELADAS/AÑO	.25	35% COMBUSTION DE COMBUSTIBLES FOSILES	10% COMBUSTION DE COMBUSTIBLES TRADICIONALES	40% COMBUSTION AGRICOLA, MANIPULACION DE TRIGO	15% FUNDICION, DESBROCE DE TIERRAS CON FINES NO AGRICOLAS, COMBUSTION DE DESPERDICIOS
EXISTENCIAS DE CO_2	280 PARTES POR MILLON	.25	75% COMBUSTION DE COMBUSTIBLES FOSILES	3% DEFORESTACION NETA PARA OBTENER LEÑA COMO COMBUSTIBLE	15% DEFORESTACION NETA PARA DESBROCE DE TIERRAS	7% DEFORESTACION NETA PARA OBTENER MADERA, FABRICACION DE CEMENTO

3. AL SUMINISTRO DE ENERGIA corresponde parte importante del impacto humano sobre el ambiente global. La mayoría de impactos pueden caracterizarse como alteraciones de los flujos preindustriales o de las existencias de sustancias ambientalmente activas (niveles de referencia naturales). El índice de perturbación antrópica es la magnitud de la alteración generada por el hombre dividida por el nivel de referencia. Los impactos que aquí se presentan, con excepción de los flujos del petróleo, implican en todos los casos aflujos a la atmósfera o concentraciones en la misma.

del diseño y de las especificaciones, lo que encarece todavía más los costes.

Es difícil cuantificar la contribución global de todos estos factores a los costes monetarios del suministro de energía, en parte porque hay factores sin relación con el entorno que se entremezclan con los ambientales. Por ejemplo, los retrasos en la construcción no obedecen sólo a las cortapisas reglamentarias, sino también a problemas de ingeniería, gestión y control de calidad. No obstante, parece probable que en los Estados Unidos la "internalización" real o buscada de los impactos ambientales haya hecho aumentar el coste monetario del suministro de productos derivados del petróleo en, al menos, un 25 por ciento durante los últimos 20 años, así como un 40 por ciento o más el coste de la generación de electricidad a partir del carbón y de la energía nuclear.

A pesar de estos gastos, los restantes costes ambientales no internalizados han sido sustanciales. En muchos casos, están aumentando. Preocupan, sobre todo, el riesgo de muerte o enfermedad por emisiones o accidentes en instalaciones energéticas y el impacto de los recursos sobre el ecosistema global y sobre las relaciones internacionales.

Es difícil imputar con seguridad los impactos de las tecnologías energéticas sobre la salud y la integridad públicas. En el caso de la contaminación atmosférica por combustibles fósiles, donde la principal amenaza contra la salud pública se atribuye a las partículas formadas a partir de las emisiones de dióxido de azufre, ha resultado imposible un consenso sobre el número de muertes causadas por la exposición a tales partículas. Las estimas difieren mucho en función de las hipótesis sobre composición del combustible, técnica de control de la contaminación atmosférica, situación de la central en relación a la distribución de la población, condiciones meteorológicas que afectan a la formación de sulfato y, sobre todo, la relación entre concentraciones de sulfato y la enfermedad.

No se conoce mejor el impacto de la fisión nuclear sobre la salud y la seguridad. En este caso, las estimas discrepantes resultan, en parte, de las diferencias de lugar y tipo de reactor, en parte de las incertidumbres sobre las emisiones en etapas del ciclo del combustible que todavía no son completamente operativas (en especial, reciclado del combustible y gestión de los residuos de la laminación de uranio y, en parte, de distintos supuestos sobre los efectos de la exposición a radiación de dosis bajas. Las mayores dudas, sin embargo, se ciernen sobre las probabilidades y consecuencias de grandes accidentes en los reactores, en las plantas de reciclado y en el transporte de los residuos.

En su conjunto y comparado con otros peligros para la población, el abanico de riesgos estimados para la salud pública procedentes de las centrales térmicas y nucleares es amplísimo y se abre desde lo negligible hasta lo sustancial. Con tales extremos, hay poca base para preferir una fuente de energía a otra. Para ambas, la magnitud de la incertidumbre es, de suyo, una contingencia significativa.

No menos importante, aunque con frecuencia desatendida, es la amenaza contra la salud pública que suponen los combustibles tradicionales utilizados para cocinar y caldear el agua en el mundo en vías de desarrollo. Quizás el 80 por ciento de la exposición global a la contaminación por partículas atmosféricas se da en esos hogares donde el humo de unas cocinas primitivas está cargado de benzopireno, que es carcinógeno, y de otros hidrocarburos peligrosos. Además, a las mujeres (que cocinan) y a los niños (que están dentro de las casas con sus madres) les corresponde una fracción grande de esta carga.

Cuesta más cuantificar el peligro ecológico que plantea el suministro de energía que las amenazas contra la salud humana y la seguridad entrañadas en las emisiones y accidentes. Pero se conoce lo suficiente para sugerir que presagian daños aún mayores para el bienestar humano. Este daño potencial nace de la combinación de dos circunstancias.

En primer lugar, la civilización depende, en buena medida, de los servicios que le ofrecen procesos ecológicos y geofísicos tales como la formación y la fertilización del suelo, la regulación del suministro de agua, el control de las plagas y de los patógenos y el mantenimiento de un clima tolerable. Pero esta misma civilización carece del conocimiento y de los recursos para sustituir, por la técnica, los servicios de la naturaleza. En segundo lugar, la acción del hombre se muestra capaz de desbaratar globalmente los procesos que le aportan los servicios mencionados. El suministro de energía, industrial o tradicional, es responsable de una sorprendente proporción de los impactos ambientales que dimanan de la actividad humana. La modificación ambiental de los últimos 100 años (impulsada, ante todo, por un aumento de veinte veces en el uso de combustibles fósiles, acrecentado por el empleo triplicado de las formas de energía tradicionales) ha supuesto nada menos que la emergencia de la civilización como una fuerza ecológica y geoquímica global.

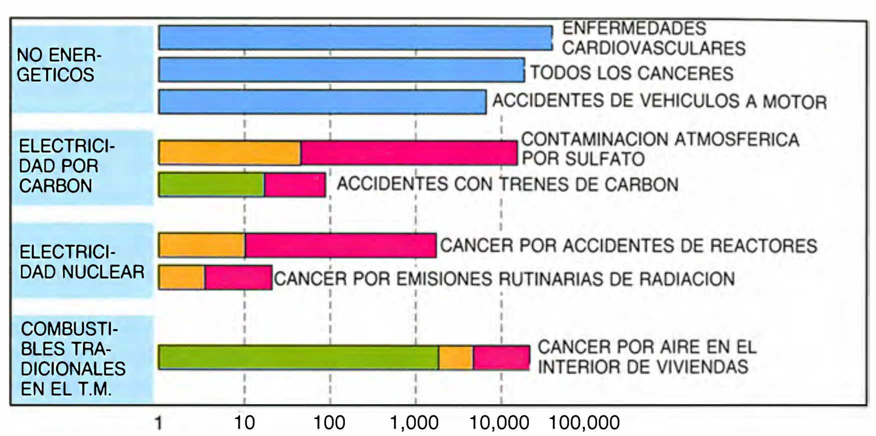
De todos los problemas ambientales, el más amenazador y, en muchos aspectos, el más inabordable es el del cambio del clima. El clima gobierna la mayoría de procesos ambientales de los que depende de manera crítica el bienestar de 5300 millones de personas. Y los gases de invernadero responsables del peligro de un cambio climático rápido provienen mayoritariamente de empeños humanos; poseen éstos tal entidad, se hallan tan extendidos y resultan tan básicos para el funcionamiento de nuestra sociedad que no se pueden alterar fácilmente. Los gases de invernadero son: el CO_2 de la deforestación y la combustión de combustibles fósiles; el metano de arrozales, tubo digestivo del ganado y explotación del petróleo y del gas natural, y los óxidos nitrosos de la quema de combustible y del uso de fertilizantes.

El único coste energético externo que podría equipararse al impacto del cambio de clima global es el riesgo de conflicto militar a gran escala. De ese

	1890	1910	1930	1950	1970	1990
POBLACION MUNDIAL (MILES DE MILLONES)	1.49	1.70	2.02	2.51	3.62	5.32
USO DE ENERGIA INDUSTRIAL POR PERSONA (KILOWATT)	.35	.30	.28	.27	.27	.28
USO DE ENERGIA TRADICIONAL POR PERSONA (KILOWATT)	.32	.64	.85	1.03	2.04	2.30
USO MUNDIAL TOTAL DE ENERGIA (TERAWATT)	1.00	1.60	2.28	3.26	8.36	13.73
USO ACUMULATIVO DE ENERGIA INDUSTRIAL DESDE 1850 (TERAWATT/AÑO)	10	26	54	97	196	393

4. TENDENCIAS del crecimiento de la población mundial y del uso de energía por persona: explican el rápido crecimiento de la demanda energética mundial durante los últimos cien años. Las formas de energía industrial son principalmente el carbón, petróleo y gas natural, con aportaciones menores de la energía hidroeléctrica y nuclear. Los combustibles tradicionales son la madera, desperdicios de cosechas y estiércol. Un terawatt equivale a mil millones de toneladas de carbón o a cinco mil millones de barriles de petróleo por año. Los datos fueron compilados por el autor del artículo.

tenor es la amenaza de un conflicto por el acceso a los recursos petrolíferos. El peligro ha menguado desde el final de la década de los setenta, pero es fácil imaginar circunstancias en las que puede plantearse de nuevo, como en la crisis del golfo Pérsico que estamos atravesando. Otra amenaza es la relación entre energía nuclear y la proliferación de armas nucleares. El tema no es menos complejo ni controvertido que la relación entre dióxido de carbono y clima; muchos analistas, entre los que me incluyo, piensan que es realmente preocupante.



5. MAGNITUDES RELATIVAS de algunos riesgos asociados a la energía y no asociados a ella. Se ilustran aquí para una población de un millón de personas. La pérdida en esperanza de vida se mide a través del número de muertes por año multiplicado por el número de años perdidos por deceso. Los datos no relacionados con la energía se basan en estadísticas de mortalidad reales para los Estados Unidos (*azul*). Los riesgos energéticos se calculan suponiendo que todo el uso de electricidad (o el uso de energía doméstica en el mundo en vías de desarrollo) proviene del origen indicado. Las estimas mínima (*verde*), intermedia (*naranja*) y máxima (*rojo*) de los riesgos se fundan en varias hipótesis sobre localización, relaciones dosis-respuestas y probabilidades de accidente (en el caso nuclear).

¿Qué perspectivas hay de reducir estos impactos? Evidentemente, la elección está en conservar las fuentes energéticas actuales o en sustituirlas por otras de costes externos inferiores.

En lo concerniente a los combustibles fósiles, la mayor parte de su impacto ambiental (incluidos los riesgos asociados a la minería del carbón y la mayoría de emisiones responsables de problemas sanitarios y de la lluvia ácida) podría reducirse sustancialmente con costes monetarios que supondrían aumentos del 30 por ciento, o menos, de los costes actuales en los Estados Unidos para los combustibles fósiles o la electricidad generada a partir de ellos. Aun así, se precisaría una fuerte inversión en reconversión o en sustitución de las instalaciones y los equipos actuales; ello representa una barrera notable allí donde el capital es escaso y las instalaciones y el equipo que hay se hallan muy por debajo de las normas exigidas. El problema del dióxido de carbono es mucho más peliagudo: sustituir el carbón por el gas natural, que libera menos CO_2 por gigajoule, constituye, en el mejor de los casos, una solución a corto plazo; extraer y secuestrar el CO_2 del carbón y del petróleo requeriría reformar gran parte de la técnica mundial de combustión de carburantes, a un coste enorme.

La energía nuclear es, sin comparación, menos perturbadora que los combustibles fósiles, desde el punto de vista climatológico y ecológico. Pero es improbable que se acepte su uso generalizado, a menos que se desarrolle una nueva generación de reactores más seguros, a menos que se pueda demostrar la gestión real –y no teórica– de los residuos radiactivos y a menos que se resuelva decididamente el tema de la proliferación. En mi opinión, las dos primeras condiciones podrían cumplirse, al menos para reactores no generadores, sin aumentar en más de otro 25 por ciento los costes actuales, ya altos, de la electricidad nuclear. La tercera condición sólo puede cumplirse internacionalizando una parte sustancial del proyecto de la energía nuclear, enfoque éste cuyo desbloqueo depende más de la política que del coste monetario. En principio, la fusión mengua los riesgos relativos a la seguridad, residuos y proliferación de la fisión, pero seguimos sin saber cuándo entrará en funcionamiento, cuánta será su contribución y a qué coste monetario.

La energía de la biomasa, sustituida incesantemente por nueva producción, evita la liberación neta de CO_2; ahora bien, costará bastante controlar los otros impactos ambientales del cultivo, la recolección, la conversión y la combustión de biomasa. El mero hecho de poner bajo control las consecuencias de la pauta actual de uso de energía de la biomasa, dada su implicación en los problemas de la deforestación y de la contaminación atmosférica, exigirá grandes inversiones de tiempo y dinero. Triplicar o quintuplicar las existencias de biomasa, que es lo que algunos prevén, sería una tarea aún más formidable, preñada de dificultades ambientales y económicas.

La opción superabundante a largo plazo cuyos costes ambientales externos pueden controlarse mejor es la de domeñar directamente la energía de la luz solar. De momento, sin embargo, se trata de la más cara de las opciones a largo plazo y puede continuar siéndolo. La decisión de pagar los costes monetarios de la energía solar, si se toma, representará la internalización definitiva de los costes ambientales de aquellas opciones que desplace la energía solar.

Hay muchas razones, pues, para pensar que las circunstancias de la energía ligadas a la civilización están cambiando de una forma fundamental, y no sólo superficial. La tendencia al alza de los costes energéticos se halla firmemente arraigada, debido sobre todo a los factores ambientales. Es plausible que, dados los actuales sistemas de suministro de energía, la técnica y los modelos de utilización final, la mayoría de naciones industrializadas se encuentren cerca del punto, o ya en él, donde un crecimiento energético adicional origine más costes marginales que beneficios. "Adelante a toda máquina" ha dejado de ser la solución.

Necesitaremos, en cambio, modificar los sistemas de suministro de energía y las pautas de utilización final, si queremos mantener los niveles actuales de bienestar; sin esas enmiendas, el consumo acumulativo de recursos de calidad superior y la capacidad mermada del ambiente para absorber los impactos energéticos conducirán a un aumento de los costes totales, incluso a tasas constantes de uso. Propiciar el desarrollo económico sin costes ambientales que socaven las ganancias exigirá la incorporación más rápida de técnicas de suministro menos gravosas y la obtención de un mayor aprovechamiento en el uso terminal.

Aunque la situación plantea retos formidables, es probable que las naciones más avanzadas posean el dinero y la técnica suficientes para superar la mayoría de los problemas. Los países más ricos podrían, si quisieran, vivir con un crecimiento energético bajo, o incluso negativo, apro-

vechando los avances en el bienestar económico logrados con un mayor rendimiento y podrían pagar la energía a precios bastante más altos para financiar la transición hacia métodos de suministro de energía menos perturbadores del ambiente. Pero no abundan los signos que apunten en esa dirección. Y todavía es más problemático que pueda hacerse en la Unión Soviética y en Europa oriental sin la ayuda masiva de Occidente.

La situación se complica en los países menos desarrollados (PMD). Quisieran industrializarse de la manera que lo hicieron los países ricos, mediante energía barata, pero ven que esa perspectiva está barrenada por los altos costes de la energía, los imponga el mercado petroquímico mundial o los determine la transición hacia opciones energéticas más limpias. Su exacerbada descapitalización acentúa su tendencia a elegir opciones más baratas en términos monetarios, y consideran que los impactos de la energía barata y sucia sobre el entorno propio constituyen un arbitrio necesario para subvenir los requerimientos humanos básicos (con formas de energía tradicionales) y promover el desarrollo económico (con formas de energía industrial).

Aunque la fracción de energía, en el cómputo mundial, que los PMD consumen es modesta, la demografía y las aspiraciones económicas de estos países representan un potencial enorme de crecimiento energético. Si este crecimiento se materializa y procede principalmente de los combustibles fósiles, como la mayoría de estos países prevén, ello añadirá una ingente carga adicional a las concentraciones atmosféricas actuales de Co_2 y otros contaminantes, en su entorno local y en el global. Y mientras se sienten agredidos (y se resisten) ante el planteamiento de un crecimiento energético paulatino que las preocupaciones sobre el ambiente global han fomentado en muchas naciones industrializadas, los PMD son, por ironía de las cosas, los más vulnerables a esa amenaza: tienen menos reservas alimentarias, más dietas marginales, una salud más precaria y menos recursos de capital e infraestructura para adaptarse.

El cambio climático global puede acarrear graves secuelas para las naciones del hemisferio sur: más sequías en la estación seca, más inundaciones en la húmeda, más hambres y enfermedades, quizá cientos de millones de refugiados ambientales. Aun cuando el norte sufriera menos por los efectos directos del cambio climático, debido a la mayor capacidad de adaptación de la sociedad industrial, el mundo está demasiado interconectado por el comercio, las finanzas, las materias primas, las fronteras permeables y las posibilidades de dar salida militar a las frustraciones.

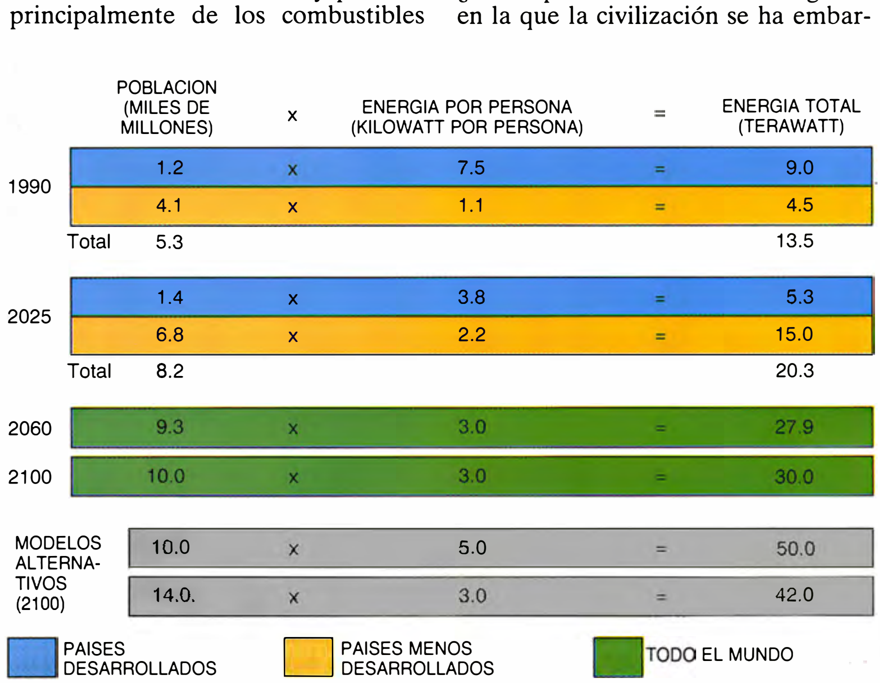
¿Cómo debe responder la sociedad a la interacción, cambiante y cada vez más alarmante, entre la energía y el bienestar humano? ¿Cómo puede la transición energética en la que la civilización se ha embarcado, en buena medida sin percibirlo, dirigirse conscientemente hacia una relación más firme y viable entre la energía, la economía y el entorno?

El primer requisito es conocer mejor, entre todos, dónde nos hallamos, hacia dónde nos encaminamos y adónde quisiéramos ir. Tendría que haber un amplio debate público, e internacional, sobre las conexiones entre la energía y el bienestar, sustentado por un esfuerzo investigador para elucidar la pauta evolutiva de los beneficios y los costes energéticos. Estudio y debate que llevarán su tiempo, porque muchos de los temas importantes se hallan rodeados de dudas y algunas tardarán décadas en despejarse.

Quizá, con más información, la situación parezca menos terrible y difícil de lo que he sugerido. O tal vez sea más amenazadora y compleja. En cualquier caso, nos enfrentamos al dilema de la acción o la dilación en un mundo incierto: si optamos por aguardar, nuestros conocimientos aumentarán, pero la eficacia de nuestras acciones podría resentirse; el daño podría hacerse irreversible, las tendencias peligrosas afianzarse, nuestras técnicas e instituciones tornarse más difíciles de guiar y reformar.

La solución del dilema reside en una estrategia doble, que consta de elementos que denomino "sin pesar" y "política de seguridad". Las acciones "sin pesar" son aquellas que nos proporcionan mecanismos para hacer frente a los cambios que tememos y, además, resultan beneficiosas aun cuando tales cambios no se produzcan en su integridad. Por contra, las acciones de "política de seguridad" ofrecen grandes medios potenciales frente a los peligros inciertos a cambio de una inversión modesta, aun cuando a la larga suceda que parte de esta inversión fuera innecesaria.

Un programa esencial "sin pesar" internaliza y reduce los costes ambientales y sociopolíticos de las fuentes energéticas existentes. Debe concederse gran prioridad a la limitación de las emisiones de óxidos de azufre y nitrógeno (procedentes de los combustibles fósiles) y las emisiones de hidrocarburos y partículas (desprendidas por los combustibles fósiles y los tradicionales). Contamos con las técnicas para controlar tales emisiones, y compensarán sobradamente sus costes al rebajar los daños contra la salud, la propiedad y los ecosistemas. Otra parte del programa debiera ser un impuesto sobre el carbono, cuyos ingresos se destinarían al desarrollo y financiación de técnicas para relajar, en todo el mundo, la dependen-



6. ESCENARIO "OPTIMISTA" para el uso mundial de energía en los próximos cien años. Se basa en un crecimiento demográfico bajo, en el progreso en el rendimiento energético y en la desaparición de la brecha entre ricos y pobres. El escenario supone que se puede alcanzar, en todo el mundo, un nivel de vida elevado a una tasa media de uso de energía de unos tres kilowatt por persona.

cia de los combustibles fósiles. También se precisan más esfuerzos para aumentar la seguridad y reducir el potencial bélico asociado a la proliferación de los reactores nucleares (salvo los regeneradores), incluyendo el desarrollo de mejores reactores y la colocación de las etapas más vulnerables del ciclo de combustible bajo control internacional.

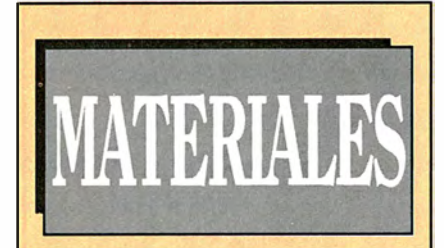
El sacarle mayor partido al uso de la energía (otro enfoque sin pesar) es la manera más eficaz de reducir el impacto ambiental. Los combustibles fósiles y el uranio ahorrados gracias al rendimiento no generan emisiones, ni crean productos de fisión ni riesgos de proliferación. El rendimiento puede también tener impactos ambientales, pero por lo general son menores, o así pueden hacerse, que los provocados por las fuentes de energía sustituidas. El aumento de la rentabilidad es la opción más económica, en términos monetarios, y la que puede expandirse con mayor celeridad; su potencial último es, a la vez, enorme y viable. El principal obstáculo reside en conseguir educar al ingente número de usuarios de la energía, cuyas acciones tienen la clave de muchos de los beneficios potenciales, y, luego, proporcionarles el capital para que saquen partido de técnicas más rentables.

Para una estrategia energética razonable importa fomentar la investigación y el desarrollo de energías alternativas a largo plazo: la energía solar, eólica, térmica oceánica y de biomasa; la energía geotérmica, que es ubicua en la corteza terrestre a gran profundidad; los reactores regeneradores de fisión; la fusión y medidas avanzadas de rentabilidad energética. La investigación debiera hacer hincapié no sólo en la consecución de vías económicas para domeñar estos recursos, sino también en la minimización de sus costes ambientales. Invertir en esta investigación cumple los requisitos de un enfoque de seguridad porque todavía no sabemos cuál de las opciones será la que se precise y con qué rapidez. Parte del dinero se malgastará, en el sentido de que algunas de las opciones nunca se explotarán. Pero la inversión que se precisa para desarrollar estas alternativas hasta el punto en que podamos elegir entre ellas de manera inteligente es modesta, si se compara con los costes potenciales que conlleva disponer de escasas posibilidades de elección.

Fomentar la cooperación Este-Oeste y Norte-Sur en temas energéticos y ambientales es una estrategia sin pesar que nos beneficiará cualquiera que sea el futuro. Puede empezar con una mayor cooperación en la investigación relacionada con la energía. Tal colaboración puede mitigar las estrecheces por las que atraviesa ese sector de la investigación, al eliminar las duplicidades innecesarias, al compartir fuerzas y al dividir los costes de los macroproyectos. (Hasta hoy, la fusión nuclear ha sido la única área de investigación que ha gozado de una cooperación internacional apreciable.) De manera especial, se impone que la cooperación mundial en la investigación energética aborde técnicas de aplicación a los países en vías de desarrollo.

No es secundaria la cooperación internacional en el estudio y control de los impactos ambientales del suministro de energía. Muchos de los problemas más amenazadores son los que no respetan las fronteras. La contaminación atmosférica y acuática de Europa oriental y la Unión Soviética atraviesa Europa occidental y llega al Artico: los impactos ambientales del suministro energético en China y la India, de débil incidencia con el uso actual de energía, podrían resultar globalmente devastadores en los niveles de consumo energético del futuro. Pero los razonamientos de los países ricos para resolver los problemas ambientales globales mediante la restricción general de energía caerán en saco roto en las naciones menos desarrolladas y en las económicamente intermedias, a menos que el primer mundo encuentre vías de auxilio a los otros dos para conseguir un bienestar económico mayor y, al mismo tiempo, la protección del entorno.

En lo que concierne al dióxido de carbono, lo mejor sería que un enfoque sin pesar del rendimiento energético (sumado a los esfuerzos de reforestación y protección de los bosques, que caen también dentro de la categoría "sin pesar") bastara para estabilizar las emisiones de CO_2 durante la fase de transición, necesariamente más lenta, hacia fuentes energéticas no basadas en el carbono, aceptables desde los puntos de vista ambiental, económico y político. Pero sería imprudente suponer que bastarán los enfoques "sin pesar". Necesitamos mayor seguridad, además de la investigación propugnada más arriba, para protegernos ante la eventualidad de que un cambio climático rápido y grave demande una retirada acelerada de los combustibles fósiles. Deberíamos tener un plan de emergencia (cuidadosamente investigado, cooperativamente desarrollado y continuamente puesto al día) para redu-



INVESTIGACION Y
CIENCIA
Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

ha publicado sobre el tema, entre otros, los siguientes artículos:

Comunicaciones ópticas por cables submarinos, Raimundo Díaz de la Iglesia.
Número 117, junio 1986.

Nuevos metales, Bernard H. Kear.
Número 123, diciembre 1986

Nuevas cerámicas, H. Kent Bowen.
Número 123, diciembre 1986

Nuevos polímeros, Eric Baer.
Número 123, diciembre 1986

Materiales para el transporte terrestre, W. Dale Compton y Norman Louis A. Girifalco.
Número 123, diciembre 1986

Materiales para la navegación aerospacial, Morris A. Steinberg.
Número 123, diciembre 1986

Nuevos materiales y economía, Joel P. Clark y Merton C. Flemings.
Número 123, diciembre 1986

Materiales para la información y la comunicación, John S. Mayo.
Número 123, diciembre 1986

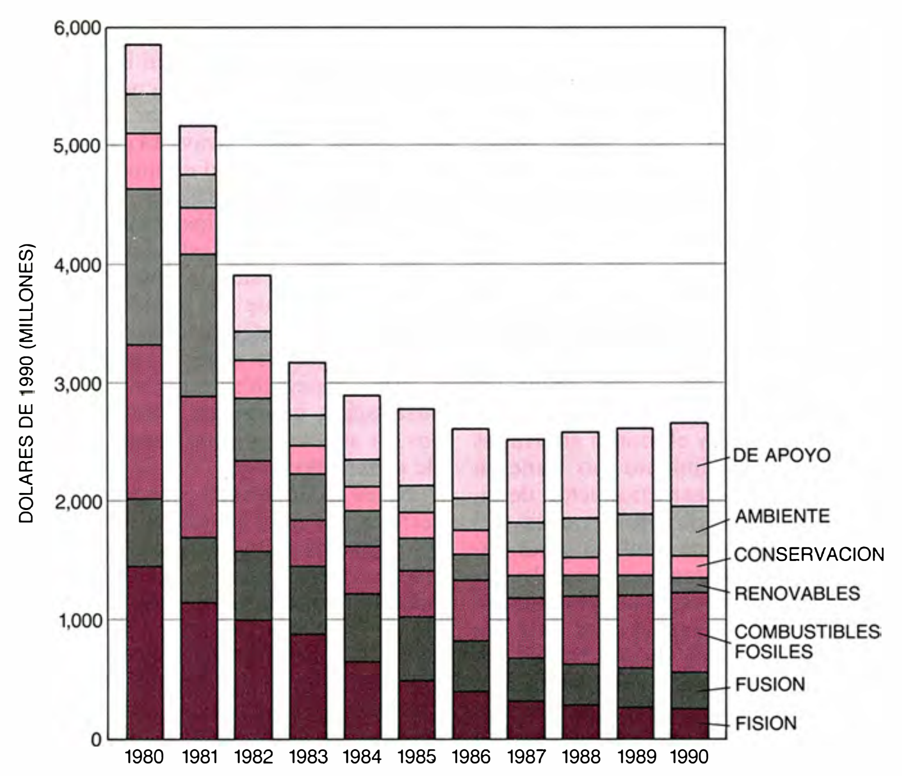
Electrones balísticos en semiconductores, Mordehai Heiblum y Lester F. Eastman.
Número 127, abril 1987

Transistores de arseniuro de galio, William R. Fresley.
Número 133, octubre 1987

Fractura del vidrio, Terry A. Michalske y Bruce C. Bunker.
Número 137, febrero 1988

Plásticos que conducen electricidad, Richard B. Kaner y Alan G. MacDiarmid.
Número 139, abril 1988

El dispositivo de efecto cuántico, ¿transistor del mañana?, Robert T. Bate.
Número 140, mayo 1988



7. FINANCIACION PARA LA INVESTIGACION ENERGETICA en los Estados Unidos, en declive desde 1990. Los histogramas representan el presupuesto de la jurisdicción federal para investigación, desarrollo y muestras técnicas, en dólares de 1990. "De apoyo" se refiere a investigación en ciencias energéticas básicas. La investigación energética federal podría recuperar su nivel de 1980 aumentando el impuesto de la gasolina sólo en tres centavos por galón [*aproximadamente, una peseta por litro*]. Adviértase asimismo que las fuerzas armadas estadounidenses gastan más de 100 veces el presupuesto total de investigación energética para "seguridad" ante acontecimientos que tienen muchas menos probabilidades de ocurrir que los cambios globales que exigen nuevas opciones energéticas.

cir las emisiones globales de carbono a una tasa del 20 por ciento por década o más, si ello resulta necesario y si las estrategias sin pesar ya en marcha no son adecuadas.

Ninguna de las medidas anteriores, ni todas ellas en conjunto, serán suficientes para salvarnos de la insensatez de fracasar en la estabilización de la población mundial. El crecimiento demográfico agrava todo problema de recursos, todo problema ambiental y la mayoría de problemas sociales y políticos. Excepto si media una catástrofe, la población mundial probablemente no podrá estabilizarse a menos de nueve mil millones de personas; sin un esfuerzo considerable para limitar su crecimiento, el número de seres humanos en el planeta puede subir hasta los 14.000 millones o más.

En 1990, suministrar una media de 2,6 kilowatt por persona a 5300 millones de individuos (un total de 13,7 terawatt) está agotando gravemente los recursos tecnológicos, administrativos y ambientales del planeta, sin que lleguen a cubrirse necesidades básicas del hombre. Supongamos, siendo optimistas, que un progreso gigantesco en el aprovechamiento de la energía posibilitara un nivel de vida aceptable a una media de tres kilowatt por persona (la mitad de la cifra que corresponde a la ex-Alemania occidental hoy en día). Entonces, nueve mil millones de personas utilizarían 27 terawatt y 14.000 millones consumirían 42. La cifra más baja de uso de energía es el doble de la de hoy; la más alta, más del triple de la actual. ¿Podemos conseguir siquiera la más baja a costes tolerables? Por duro que sea controlar el crecimiento demográfico, es probablemente más fácil que suministrar energía (y comida, y agua, y mucho más) a un número creciente de personas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

BIOFUELS, AIR POLLUTION, AND HEALTH: A GLOBAL REVIEW. Kirk R. Smith. Plenum Press, 1987.

GLOBAL ENVIRONMENTAL ISSUES RELATED TO ENERGY SUPPLY. John P. Holdren en *Energy*, vol. 12, n.º 10-11, págs. 975-992; 1987.

POLICY OPTIONS FOR STABILIZING GLOBAL CLIMATE. Dirigido por Daniel A. Lashof y Dennis A. Tirpak. Agencia de Protección Ambiental, 1989.

Juegos de ordenador

Cómo resucitar un gato a partir de una mueca

A.K. Dewdney

"En esta ocasión [el gato de Cheshire] se fue esfumando con gran lentitud, empezando por la cola y terminando por la mueca, que permaneció en el aire algún tiempo después de haberse desvanecido todo lo demás."

–LEWIS CARROLL
Alicia en el País de las Maravillas

El sistema de examen clínico conocido en los países anglosajones por las siglas CAT (y en España por TAC, tomografía axial computarizada, el popular "escáner") va a prestarnos su nombre para un nuevo ejercicio de matemática recreativa, en el que los lectores habrán de esforzarse en reconstruir objetos desconocidos a partir de los que podríamos llamar rayos X digitalizados, o más brevemente, rayos D. Quizás el gato de Cheshire no pueda reconstruirse a partir de su sonrisa, pero algunos gatos sin duda lo serán a partir de sus digitografías.

Allan M. Cormack y sir Godfrey N. Hounsfield compartieron, en 1979, el premio Nobel de medicina por la invención del sistema de exploración mediante tomografía axial computarizada. El aparato que inventaron logra combinar con auxilio de un ordenador una serie de "rebanadas" roentgenográficas del paciente y reconstruir a partir de ellas una sección transversal de su anatomía, con todos sus huesos, vasos sanguíneos, grasa y demás tejidos.

Los equipos ordinarios de rayos X crean una imagen bidimensional similar a una sombra. Mi cuerpo, bajo la luz solar, proyecta sobre la pared una sombra que muestra claramente mi silueta. Pero a la "luz" de un haz de rayos X, mi silueta aparece rellena por huesos y otros órganos internos. Las exploraciones por TAC no se parecen en nada a las anteriores. En este caso, los rayos X no rocían y atraviesan la totalidad de mi cuerpo; están, por el contrario, confinados a un plano. Producen del lado opuesto de mi cuerpo lo que sólo podríamos describir como una sombra unidimensional, una estrecha banda de claroscuros que revela la presencia de órganos y huesos en ese plano, visibles, por otra parte, tan sólo desde ese ángulo.

1. Un paciente en un escáner TAC.

Como muestra la figura 1, el paciente se sitúa en el interior de un escáner TAC, de forma que una fuente de rayos X pueda proyectar su haz a través del paciente según un plano específico. Del lado contrario del paciente, una hilera de detectores registra la radiación que pasó a su través según ese ángulo concreto. La sombra unidimensional se transmite inmediatamente después, ya en forma digital, a un ordenador. Todo ello se conjuga para crear una instantánea, por así decirlo.

La siguiente toma se efectúa desde un ángulo ligeramente distinto. Se hacen girar un poco la fuente y el detector de rayos X, y un nuevo haz "rebana" al paciente por el mismo plano. La nueva tanda de lecturas se envía también al ordenador.

Cuando el ordenador dispone de suficientes tomas, comienza a reconstruir la sección transversal del paciente en el plano de todos los rayos X. ¿Y cómo se logra esto? No es preciso ser premio Nobel para comprenderlo. De hecho, aunque a escala más modesta, nosotros vamos a hacer exactamente lo mismo que el ordenador. Mas, en lugar de pedir a los lectores que inviertan 50 millones de pesetas en un escáner TAC, les proporcionaré una tomografía axial cómputo-recreativa que no requiere sino lápiz y papel milimetrado.

La versión recreativa a la que he bautizado "grafiscáner" reconstruye imágenes bidimensionales compuestas por los cuadraditos blancos y negros de una imagen cuadriculada como la que vemos en la figura 2. Para quienes estimen que este ejercicio carece de dificultad, me apresuraré a decir que normalmente no se proporciona ninguna imagen, sino tan sólo la información procedente de los llamados rayos D.

La imagen es atravesada por rayos D, pero solamente desde dos direcciones. Un haz de rayos horizontales penetra de derecha a izquierda en el objeto y se registra en forma de una serie de números. Cada número expresa el número de cuadros negros de una hilera particular de la imagen cuadriculada. Un haz de rayos D verticales fluye a través del objeto, de abajo arriba. El haz se registra también mediante una secuencia de números, con la misma interpretación, a saber, número de cuadrículas negras, con un número por columna. En la ilustración, por ejemplo, el número adyacente a la segunda hilera es un 2, pues la segunda fila contiene justamente dos cuadros negros. Cada cuadro negro aporta una unidad al número descriptivo de la fila. A partir de tan sencilla observación se deduce

un hecho importante: que la suma de los valores de las filas es igual a la suma de los valores por columnas.

Pero, dejando de lado estas lindezas teoréticas, ¿será posible reconstruir la configuración inicial con los datos de dos haces únicamente? La respuesta depende de la pauta concreta de cuadrados blancos y negros que compongan el objeto. Por comodidad, daré el calificativo de "categóricas" a las configuraciones cuya reconstrucción es posible merced a razonamientos lógicos, y de "catastróficas" a las no reconstruibles.

Antes de enzarzarse demasiado en la caracterización de las configuraciones catastróficas, voy a ofrecer un ejemplo que demostrará ser categórico. El ejemplo en cuestión es la espiral que vemos en la figura 2. En cuanto el grafiscáner ha terminado de bombardear la configuración con rayos D, los sensores contiguos a las filas revelan la secuencia 8, 2, 6, 4, 5, 3, 7, mientras que en los situados sobre las columnas leemos 7, 1, 6, 3, 4, 5, 2, 7.

Para reproducir la espiral a partir de las dos secuencias, el escáner podría ir generando todas las posibles combinaciones de cuadrículas blancas y negras, hasta dar con una configuración que produjese las secuencias originales. El número de las mismas sólo es de unos 1000 billones. Felizmente, podemos desarrollar una técnica muy superior para la reconstrucción de la espiral.

En todo conjunto de lecturas de los sensores deducido de una configuración categórica, una de las lecturas comprendidas en una de las secuencias será igual al número de lecturas no nulas de la otra. En el caso de la configuración espiral los sensores contiguos a las filas muestran siete lecturas no nulas, y la secuencia asociada con la primera columna contiene un "7". Podemos deducir, en consecuencia, que la primera columna contiene siete cuadros negros, uno en cada una de sus siete filas.

Estos siete cuadros negros aportan cada uno una unidad a cada una de las lecturas asociadas con las filas. Así pues, para determinar las posiciones de los otros cuadros negros, se cambia el 7 por un 0 en la secuencia de columna y se resta una unidad de cada lectura no nula de la secuencia de filas. Se obtienen así dos sucesiones nuevas:

Filas: 7, 1, 5, 3, 4, 2, 6
Columnas: 0, 1, 6, 3, 4, 5, 2, 7

Observemos que al menos una de las lecturas de una de las secuencias es igual al número de lecturas no nulas de la otra secuencia. En realidad, dado que hay más de una, los lectores pueden elegir a su gusto con cuál van a trabajar a continuación. El resultado final será el mismo. Si, por ejemplo, se elige el 7 de la primera secuencia, se rellenan las cuadrículas adecuadas y se efectúan las operaciones aritméticas, la secuencia siguiente será:

Filas: 0, 1, 5, 3, 4, 2, 6
Columnas: 0, 0, 5, 2, 3, 4, 1, 6

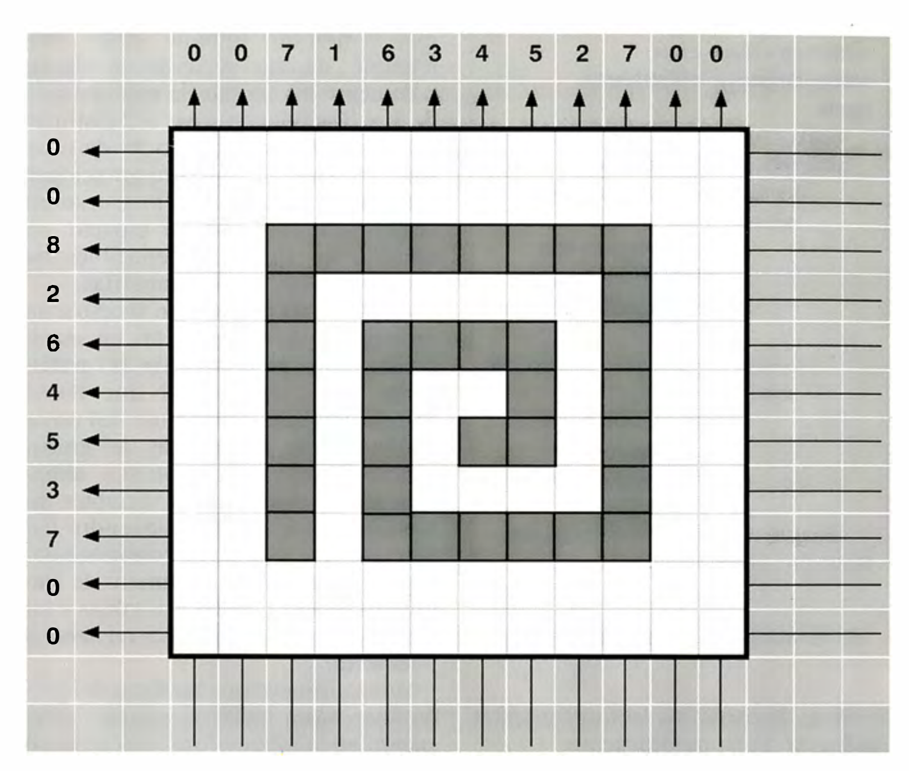
En cuanto todos los números han sido reducidos a cero, la imagen de la espiral estará mirándonos a los ojos.

El grafiscáner no logra descifrar todas las configuraciones con la misma sencillez que la espiral. Si colocásemos en él dos configuraciones que generasen la misma secuencia de números se produciría una catástrofe. El lector podrá, sin duda, obtener ejemplos tras unos cuantos tanteos.

Sin embargo, el examen sistemático de las configuraciones catastróficas seguramente permitirá observar que todas ellas poseen unas peculiaridades a las que llamo cadenas. Supongamos que dos configuraciones diferentes –sean éstas la A y la B– producen las mismas secuencias de números. La configuración A habrá de tener entonces el mismo número de filas y columnas que la configuración B. Al superponer las configuraciones A y B tiene que haber al menos una cuadrícula negra en A que se superponga a una cuadrícula blanca de B (pues si no, las configuraciones no serían diferentes). Esta cuadrícula constituye el primer eslabón de la cadena.

Empero, si toda la diferencia entre las figuras A y B consistiera en esta cuadrícula, las lecturas proporcionadas por los sensores no serían las mismas para A y B. Así pues, la fila que contiene a la primera cuadrícula ha de contener también una segunda cuadrícula que es blanca en A y negra en B. Esta segunda cuadrícula constituye el segundo eslabón de la cadena. Análogamente, la columna que contiene a la segunda cuadrícula ha de contener también una tercera que sea negra en A y blanca en B. Ya tenemos el tercer eslabón. Por repetición del procedimiento, podemos hallar otros eslabones de la cadena. Al cabo, la cadena ha de volver a la cuadrícula primera, garantizando así que no haya diferencias entre las lecturas de A y B.

El estudio de las configuraciones catastróficas conduce a dos teoremas. El primero enuncia que una configuración catastrófica se convierte en otra de la misma naturaleza al cambiar por su opuesto el color de cada cuadrícula de su cadena. Tal transformación podría ser útil para la descripción de reconstrucciones ambiguas. En efecto, la sencilla técnica arriba expuesta para la reconstrucción de configuraciones categóricas puede modificarse con el fin de reproducir parcialmente configuraciones catas-



2. Lecturas de una espiral categórica en un grafiscáner.

```
entrada de x-lista e y-lista
entrada de xrecuento e yrecuento
repetir
   hecho <-- 0
   para cada posición I de la lista
        si x-lista (I) = yrecuento y hecho = 0
          entonces x-lista (I) <-- 0
                para cada y-lista (J) > 0
                  decrementar y-lista (J)
                  colorear la cuadrícula sita en (I,J)
                hecho <-- 1
        si y-lista (I) = xrecuento y hecho = 0
          entonces y-lista (I) <-- 0
                para cada x-lista (J) > 0
                  decrementar x-lista (J)
                  colorear la cuadrícula sita en (J,I)
                hecho <-- 1
   computar nuevos xrecuento e yrecuento
hasta que xrecuento = 0
```

3. Esbozo del programa MUECA.

tróficas. Invito a los lectores a tratar de lograr dicha modificación.

El segundo teorema afirma que una configuración es categórica si y solamente si carece de cadenas. Me pregunto cuántos lectores pueden ahora justificar, sirviéndose del teorema, el método de reconstrucción de configuraciones categóricas que antes expliqué. ¿Cómo puedo yo estar tan seguro de hallar en una de las secuencias un número que señale el número de lecturas no nulas de la otra secuencia? Baste una sencilla indicación: ¿qué consecuencias podríamos deducir sobre la configuración si tales números no existieran?

También se puede aplicar el segundo teorema para determinar el número de configuraciones categóricas que tienen un tamaño dado. Por ejemplo, aunque al pintar de blanco o de negro las casillas de una plantilla de 3 × 3 se pueden crear 512 distintas configuraciones, tan sólo 99 de ellas son categóricas. Las configuraciones categóricas de 3 × 3 se muestran en la figura 5. Para ahorrar espacio, he omitido las que son deducibles de otras mediante giros o simetrías.

Los lectores que tengan acceso a un ordenador pueden redactar un sencillo programa de simulación del grafiscáner. El programa, al que llamo MUECA, empieza solicitando del usuario la lista de las lecturas del grafiscáner. Seguidamente, MUECA almacena las lecturas en dos variables dimensionales a las que convendrá llamar *x-lista* e *y-lista*. A continuación, el programa solicita el número de elementos no nulos de las dos tablas y los almacena en las variables *x-recuento* e *y-recuento*.

MUECA inspecciona las listas del grafiscáner hasta hallar el número *x-recuento* en la tabla *y-lista*, o el número *y-recuento* en *x-lista*. El programa efectúa las operaciones aritméticas necesarias, traza sobre la pantalla los cuadraditos correspondientes y seguidamente asigna el valor 1 a la variable *hecho*. Este último paso sirve para que el programa no repita todas las instrucciones anteriores antes de haber tenido ocasión de recalcular *xrecuento* e *yrecuento*. Cuando *xrecuento* llega a tomar el valor 0, todos los números no nulos han sido procesados ya, *hecho* se ajusta a 0 y el ordenador se echa una siesTACita. Se da en el recuadro una versión un tanto abreviada del algoritmo.

He aquí algunas configuraciones categóricas con las que probar mano en su grafiscáner. Combinando, por un momento, lo médico con lo recreativo, recientemente se encontró la configuración categórica siguiente en el grafiscáner de un gato. ¿Qué es lo que éste se había comido?

Filas: 9, 5, 7, 5, 6
Columnas: 5, 3, 5, 0, 5, 2, 5, 0, 1, 5, 1

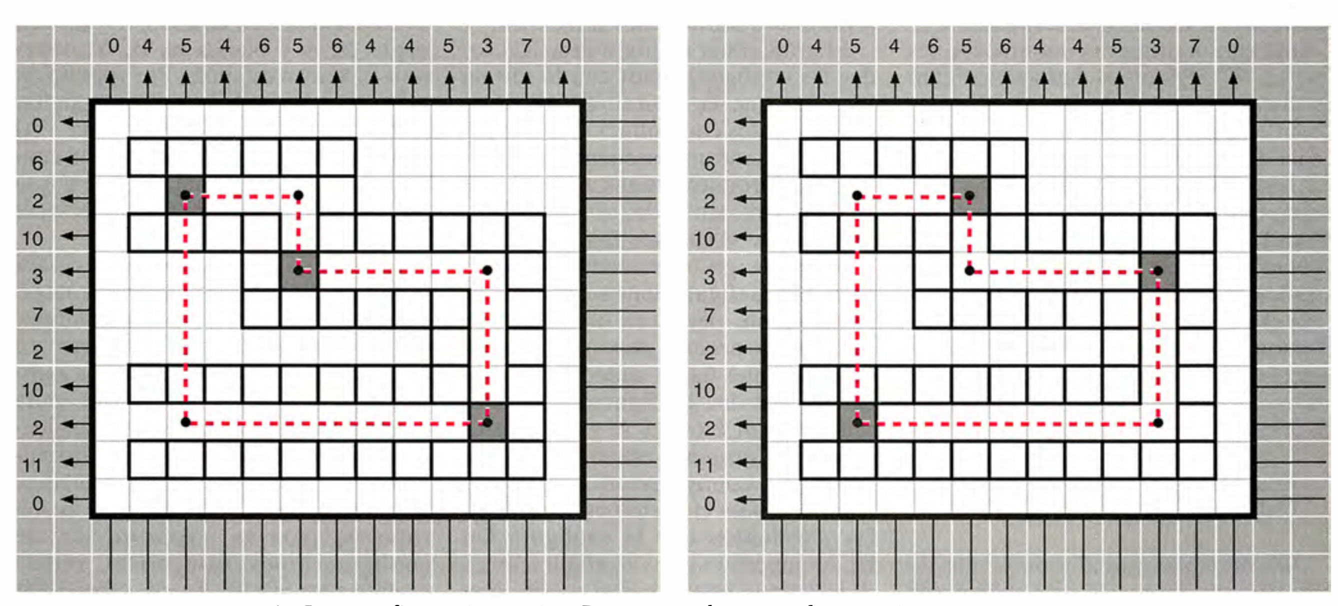
Hace poco, un amigo me trajo una caja que él no conseguía abrir, por haber perdido la llave. ¿Podría yo determinar el contenido de la caja? Aunque mi grafiscáner reveló un objeto de reconstrucción ambigua, pude saber inmediatamente de qué se trataba.

Filas: 11, 5, 4
Columnas: 3, 2, 3, 1, 1, 1, 1, 2, 3, 2, 1

He aquí, finalmente, el más difícil de todos los problemas de grafiexploración. Al habernos planteado el problema sobre una plantilla cuadriculada, parece que el juego de datos para la reconstrucción habrá de limitarse a sólo dos conjuntos de rayos D, uno horizontal y otro vertical. Pero, ¿qué ocurre con las diagonales? De ser lícito utilizar también líneas oblicuas, resultan posibles cuatro grupos de rayos D, y la clase de los objetos fiablemente reproducibles se incrementa de forma espectacular.

Los rayos D siguientes fueron tomados primero horizontalmente, luego en diagonal, luego verticalmente y, por fin, según la otra diagonal.

Horizontal: 1, 13, 17, 17, **14**, 14, 12, 6, 6, 6



4. Las configuraciones A y B y una cadena que las convierte una en otra.

Primera diagonal: 1, 2, 5, 6, 4, 4, 6, 7, 7, 8, **8**, 5, 6, 6, 6, 6, 5, 5, 3, 3, 1, 1, 1

Vertical: 2, 1, 1, 3, 3, 6, 6, 8, 9, 7, 5, **5**, 5, 5, 6, 8, 8, 8, 4, 4, 2

Segunda diagonal: 1, 2, 2, 2, 2, 4, 5, 4, 5, 5, 4, 5, 6, **6**, 9, 9, 7, 5, 5, 4, 2, 3, 3, 3, 2, 1

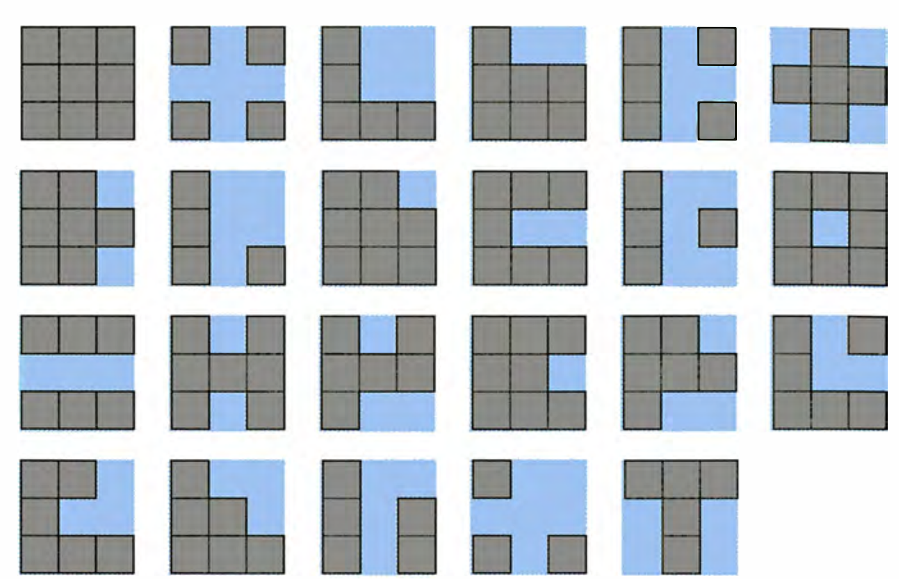
La horizontal se registró desde el lado izquierdo del objeto; el primer haz diagonal, desde el ángulo inferior izquierdo, y el segundo haz diagonal, desde abajo y hacia la derecha del objeto. Uno de los números de cada secuencia aparece en negrita. Dicho número representa el rayo que pasó a través del centro del objeto.

Aunque el proceso de reconstrucción puede echar mano de cualquiera de las ideas aquí expuestas, sigue sin haber sustituto para el pensamiento lógico clásico, aunque no esté de moda. Los lectores pueden incluso probar suerte con una de las primeras técnicas utilizadas en la formación de imágenes para diagnóstico clínico, conocida por "proyección retrógrada".

Resulta posible determinar un perfil mínimo dibujando la región en la que se encuentran presentes en el cuadriculado los cuatro rayos D. Después se retroproyecta. Dado que cada número corresponde a un rayo específico (sea horizontal, vertical o diagonal), podemos distribuir retrógradamente tal número sobre cada una de las casillas interceptadas por el rayo, como si éste hubiese atravesado una región de gris uniforme. Tal tono de gris queda plasmado en un promedio: divídase el número entre el número de cuadrículas que hay en él.

El tono de gris puede ser anotado numéricamente en las casillas (aunque hará falta buen pulso); mucho mejor, puede quedar reflejado mediante cierto número de puntos. Por ejemplo, si el cociente resulta ser 0,8, se colocan 8 puntos en cada una de las cuadrículas del rayo. Un cociente de 1,2 exigiría 12 puntos. Se trata de un proceso lento, pero muy adecuado para un viaje largo, una comida tranquila o una tarde aburrida. Cuando vayan a pintarse puntos en un cuadrado por segunda, tercera o cuarta vez, será preciso hallar sitio para los puntos adicionales. Al final del proceso, el objeto no aparecerá delimitado con demasiada precisión, pero sí será claramente visible. Podemos realzar el contraste dejando en blanco las cuadrículas cuyo número de puntos sea inferior a cierto mínimo. Tal técnica se denomina "depuración por valor umbral".

Para acelerar la tarea, los lectores podrían adaptar a sus gustos el programa MUECA. Obviamente, los lógicos se empeñarán en determinar deductivamente qué cuadrados son los negros, lo cual puede lograrse mediante un proceso de eliminación similar al de la técnica de reconstrucción de perfiles categóricos. No obstante, me parece que lógicos y programadores van a encontrarse con que la solución es el maullido del gato.



5. Un censo de las configuraciones categóricas de 3 por 3.

Los políticos, los directivos de grandes sociedades e incluso los articulistas de revistas científicas pueden incurrir en abusos de las matemáticas cuando, sea a sabiendas o sin darse cuenta, confunden a otros o se engañan a sí mismos al tratar de relaciones numéricas, geométricas e incluso lógicas. Me había parecido que el tema del abuso de las matemáticas sería materia sencilla de tratar para el artículo de "Juegos de ordenador" de mayo pasado, pero muchos lectores –y yo mismo– vimos que la cuestión del abuso de las matemáticas es un tema insólitamente delicado.

Así, por ejemplo, afirmaba yo en el artículo de mayo que la probabilidad de ganar en cierta lotería era menor que la de que cayese un meteorito en el barrio. Muchos lectores se quejaron de que había vecinos suyos que habían ganado premios gordos en la lotería y, en cambio, ninguno había informado de impactos de meteoritos. Mi cálculo se fundaba en una estimación del número de meteoritos que llegan a la Tierra en un día dado. Una cifra mínima sería la de tres. ¿Qué probabilidad hay de que el kilómetro cuadrado en el que habito sea el punto de aterrizaje de uno de ellos? Aproximadamente el doble de la de ganar en la lotería que describí.

A casi todo el mundo, la palabra "meteorito" le sugiere uno de esos monstruos de ferroníquel que se exhiben en los museos. En realidad, la inmensa mayoría de los meteoritos que penetran en la atmósfera terrestre pesan menos de un gramo, incluso los más brillantes. Un meteorito menudo se quemará casi por completo (aunque no del todo) y, al sumergirse en las capas más densas de la atmósfera, se verá rápidamente frenado hasta una velocidad moderada. No producirá el estruendo de una condrita carbonácea al perforar el tejado, sino un leve "ping" en la gravilla.

Cientos de lectores dieron cuenta de ejemplos de abusos matemáticos. Sus cartas me han animado a llevar un diario de ellos y a confeccionar un catálogo de horrores que están pidiendo un bis en una sección próxima. Descubriremos entonces cómo nos la están dando con queso, desde los organismos del estado hasta ciertas empresas enteramente faltas de pudor, por no hablar de la candidez de un público dispuesto a engullir cualquier declaración que parezca provenir de una autoridad.

El libro *El hombre anumérico* de John Allen Paulos se inspiró en parte en un artículo seminal de Douglas R. Hofstadter, publicado en estas páginas en julio de 1982. ¿Es el "anaritmetismo" o analfabetismo numérico lo mismo que el abuso de las matemáticas? No del todo. El anaritmetismo viene a ser la ignorancia de las nociones matemáticas fundamentales que gobiernan la cantidad, la forma, la lógica y así por menudo. Podemos, empero, estar perfectamente "aritmetizados" y consentir, por descuido, los abusos. Peor todavía, podemos perpetrarlos incluso sin pensar. La

voluntad de pensar críticamente permite separar los términos.

Muchos lectores de nivel matemático adecuado resolvieron el problema de mayo, que trataba de una curiosa lotería. Cada billete portaba dos números. El primera iba impreso en los billetes en orden consecutivo. El segundo formaba parte de una gran permutación. Por ejemplo, si la lotería constase solamente de cinco billetes, estos números podrían ser 1-4, 2-3, 3-1, 4-5, 5-2. En este caso nadie ganará, pues para lograrlo ambos números han de coincidir. Si se emiten n billetes, la probabilidad de no coincidencia converge muy rápidamente hacia $1/e$, siendo e la base de los logaritmos naturales, aproximadamente igual a 2,7183. Dicho de otro modo, no es preciso que n sea muy grande –alrededor de 10– para poder yo afirmar que la probabilidad de que nadie gane en la lotería es de 0,3679. Al crecer n más y más, la probabilidad apenas si varía.

Pero, ¡esta lotería podría hacer saltar la banca! Después de todo, podría suceder que los números coincidiesen en todos los billetes. ¿Cuál es el número medio de ganadores de esta extraña lotería? La respuesta, bastante sorprendente, es 1.

Entre los lectores que resolvieron los problemas que propuse sobre lotería había muchos que los conocían ya, por tratarse de problemas elementales de probabilidad; otros los atacaron por sus propios medios. Para calcular la probabilidad, tan sólo hay que saber contar el número de formas en que una permutación de 1, 2, 3,... n puede no dejar a ninguno de estos números en la posición que le corresponde en la serie natural. Para calcular dicho número se parte del total de $n!$ permutaciones y se le restan las $n(n-1)!$ permutaciones en las que al menos unos de los n números se encuentra en su propia posición. Pero al hacerlo restaríamos demasiado. Por tanto, se suma el número de formas en que dos números pueden hallarse en su propia posición, multiplicado por $(n-2)!$, que es el número de permutaciones de los números restantes. Pero entonces se sumaría demasiado. Y así se desarrollaba la serie. Era infinita, desde luego; pero al dividir por $n!$ bastaban unos cuantos de los primeros términos para proporcionar un valor francamente aceptable de la probabilidad.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

IMAGE RECONSTRUCTION FROM PROJECTIONS: THE FUNDAMENTALS OF COMPUTERIZED TOMOGRAPHY. Gabor T. Herman. Academic Press, 1980.

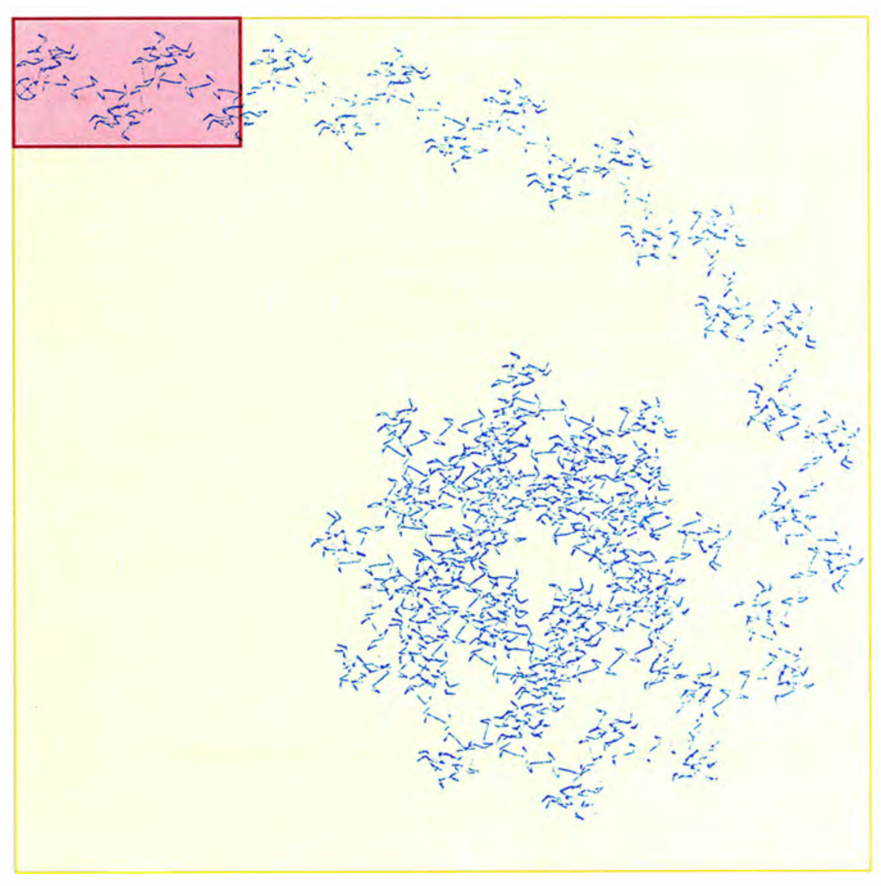
Juegos matemáticos

Estudio termodinámico de las curvas definidas por sucesiones

Ian Stewart

"Cuatro coma cincuenta y siete grados a la derecha, amor... estupendo... baja un poquitín la mano izquierda... super..., lindísima, fantástico... once coma sesenta y dos grados izquierda... mantenla en alto, está saliendo bien, bien bien!"

Jacobo Plantillas (familiarmente Jaco), recién ascendido a inspector municipal de la villa de Rascalbolso, conocida por sus centros comerciales, se echó las manos a la cabeza. Había advertido al arquitecto municipal que no se le ocurriera contratar a Sandy Warthog para proyectar la distribución de plazas de estacionamiento en el hipermercado local. Bastaba con una sencilla y ordenada parrilla, trazada de rectas. Pero Warthog, cuyo principal título de nombradía parecía consistir en la construcción de estatuas de basureras a escala natural —que erigía instalando un contenedor auténtico sobre un pedestal de cemento—, no estaba de acuerdo. Los críticos de Warthog consideraban que sus trabajos eran una porquería, pero el arquitecto municipal había ido ascendiendo desde el servicio de recogida de basuras y tenía a Warthog por un auténtico genio.



1. La curva de Warthog. En la figura 12 puede verse una ampliación de la región recuadrada.

Y la verdad es que el trazado que iba cobrando forma en plástico amarillo termoestable sobre la superficie del aparcamiento era francamente notable: un complejo sistema de volutas y espirilos [*figura 1*], que zigzagueaban de acá para allá, aunque no exactamente al azar. Jacobo recordaba todavía sus discusiones con Warthog al respecto. "Sandy, lo que hace falta son líneas rectas. Analízalo con lógica. ¡Nada de fantasías!" A lo que Warthog había respondido: "Es que... verás... las líneas rectas son tan... ¡tan lineales!" Y el arquitecto municipal le había dado la razón a Warthog, con la esperanza —pensaba Jacobo— de ganar un premio de diseño arquitectónico, los cuales —seguía pensando— siempre iban a parar a diseños intelectualmente pretenciosos, muy monos, sí, pero nunca a nada práctico. "Quiero diseñar algo más superficial", dijo Warthog.

Jaco siempre había tenido por superficial todo cuando Warthog hacía, y no se privó de decírselo. Pero Warthog replicó (*i*) tildando a Jaco de jíbaro ignaro y (*ii*) definiendo "superficial" como "de dimensión mayor que 1". "¿Cómo va a tener una curva dimensión mayor que 1?", retrucó Jaco. Pero, en lugar de explicárselo, le respondieron que, gracias a las imaginativas investigaciones de Michel Mendès France, las curvas no sólo podían tener dimensión mayor que 1, sino también entropía, temperatura, volumen y presión.

Mendès France definió las magnitudes anteriores valiéndose de una analogía con la termodinámica. Empecemos por la dimensión, que es la más sencilla. En los tiempos en que vivimos, llenos de fractales, la idea de que la dimensión pueda no ser entera ya no provoca mucha perplejidad, e incluso suena razonable que una curva suficientemente sinuosa haya de tener dimensión mayor que otra relativamente lineal. Mendès France, en colaboración con Michel Dekking, descubrió un procedimiento razonable para su definición, que vemos en la figura 2. Su noción de dimensión no es equivalente a la dimensión de Hausdorff-Besicovitch, habitualmente utilizada para estudiar fractales.

Como Warthog le explicó a Jacobo, se dice que una curva es *lineal* si su dimensión es 1; *superficial*, si su dimensión es mayor que 1. Por ejemplo, una espiral logarítmica [*figura 4a*] es lineal, mientras que una espiral arquimediana [*figura 4b*] es superficial. Dekking y Mendès France hallaron un filón inagotable de curvas su-

perficiales, construidas mediante polígonos infinitos. Para explicar su método, señalemos primero que cada número real x determina unívocamente una dirección en el plano, que forma con la horizontal un ángulo de $2\pi x$ radianes (o, si se quiere, de 360 x grados) [*figura 3*]. Los números reales x comprendidos entre 0 y 1 proporcionan ya todas las direcciones posibles; además, al sumar a x un entero cualquiera resulta la misma dirección. Es decir, la dirección depende solamente de la parte de x que vaya tras la coma decimal, conocida por mantisa (o parte decimal), a la que denotaremos $\{x\}$ o x (mód 1).

"Mira, Jaco, pareces una nécora triste", dijo Warthog afablemente. "Elige una sucesión x_0, x_1, x_2,... que sea de tu gusto. Por ejemplo, podríamos tomar

$$x_n = \text{sen}\,(\sqrt{n}),$$

con lo que la sucesión irá siendo

0; 0,0174...; 0,0246...; 0,0302...

etc. (si $\sqrt{n}$ está en grados). Se construye entonces una curva poligonal $G(x)$ de la forma siguiente.

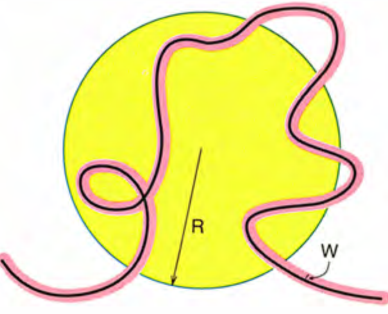
"A partir de un punto inicial, dibuja un segmento rectilíneo de longitud fija en la dirección correspondiente a x_0 [*véase la figura 5*]. Arrancando de su extremo, dibuja otro de la misma dirección en la dirección correspondiente a x_1. Desde el extremo de éste, otro igual de largo en la dirección asociada a x_2, y así una y otra vez, avanzando indefinidamente por la sucesión infinita."

Tomando la sucesión anterior se obtienen sucesivas direcciones inclinadas con la horizontal según los ángulos

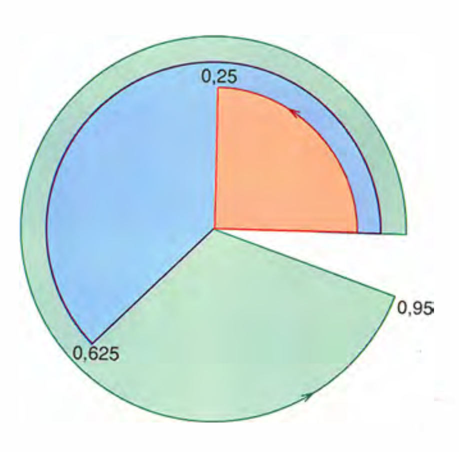
0 × 360°	=	0 grado	
0,0174... × 360°	=	6,264...	grados
0,0246... × 360°	=	8,856...	grados
0,0302... × 360°	=	10,872...	grados

y así sucesivamente. Vemos en la figura 5 las tres primeras etapas de la curva poligonal, y en la figura 6 (a escala mucho menor) un segmento mucho más largo. Resulta obvio que esta curva va desplazándose hacia la derecha, trazando bucles dobles cada vez un poco más amplios. Los bucles van creciendo lentamente y se mantienen separados unos de otros, por lo que la curva es lineal y no superficial.

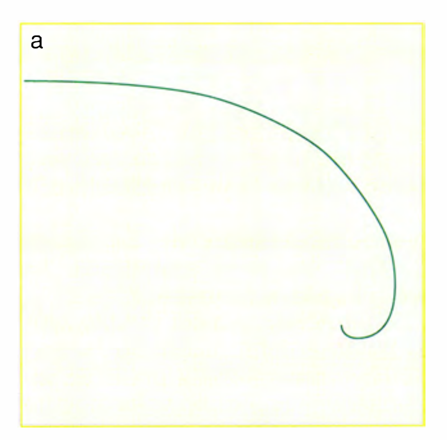
Cada sucesión $x = (x_n)$ engendra una curva $G(x)$ diferente; se dan ejemplos en la figura 7. La curva que Sandy Warthog estaba trazando en el

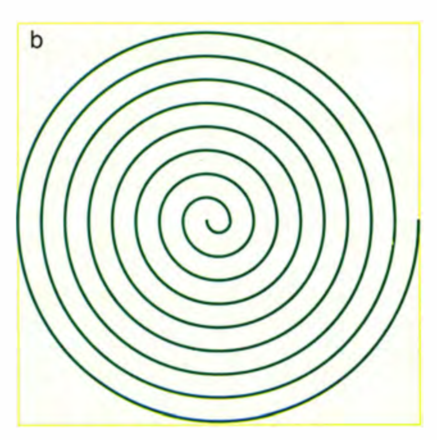


2. La dimensión de una curva, según Mendès France. La curva dada se encierra en una banda de anchura 2W (en rosa)*; sea A el área de la porción de banda yacente en el interior de un círculo de radio R. La dimensión es el límite de log A/log R cuando $R \to \infty$ y $W \to 0$, suponiendo que exista.*

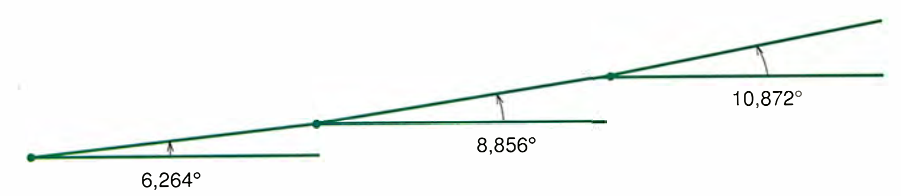


3. Conversión de números reales en direcciones. El número 1 equivale a una vuelta completa y determina por tanto la misma dirección que 0.

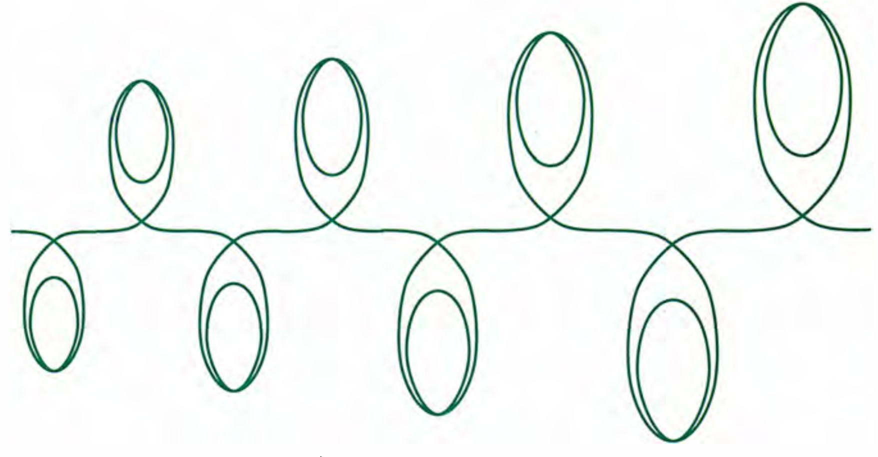




4. (a) *La espiral logarítmica, cuya ecuación en coordenadas polares es $r = e^{\theta}$, tiene dimensión 1.* (b) *La espiral arquimediana, cuya ecuación en polares es $r = \theta$, tiene dimensión mayor que 1.*



5. Las tres primeras etapas de la construcción de G(sen$\sqrt{n}$).



6. La línea G(sen$\sqrt{n}$) al cabo de varios centenares de etapas.

Recuadro 1 Algoritmo para el trazado de G(x)

Supondré que x_n está especificado por una fórmula o subrutina dada aparte. Se elige un punto inicial (*sx, sy*) y un factor de escala *sf*, que dependerán del sistema de trazado gráfico disponible. La orden *punto* dibuja un punto de coordenadas especificadas; la orden *recta* conecta dos puntos mediante un segmento. El algoritmo es

```
punto (sx, sy)
                    x = sx : y = sy
repetir para n = 0, 1, 2, ..., hasta valor final:
                    x1 = x + sf cos(2πxn)
                    y1 = y + sf sen(2πxn)
recta (x, y) hasta (x1, y1)
x = x1
y = y1
fin repetir
```

aparcamiento del hipermercado pertenecía a esta categoría. Los émulos de Warthog pueden construir muchas más por sí mismos (se les sugiere empezar por el trazado en papel, y no emprenderla con los aparcamientos sin disponer de licencia municipal). Se ofrece un algoritmo al caso en el recuadro 1, redactado en pseudocódigo; puede efectuarse a mano (muy trabajoso) o mediante ordenador, y elegir cada cual una sucesión propia.

Dekking y Mendès France han caracterizado las sucesiones x que generan curvas superficiales. Hablando con precisión, demostraron que la sucesión x se encuentra "equidistribuida módulo 1", si y solamente si la totalidad de las curvas $G(mx)$ son superficiales, para todo entero positivo m. La sucesión mx es la que tiene por términos mx_0, mx_1, mx_2,... etc. Se dice que una sucesión está equidistribuida módulo 1 si las direcciones correspondientes se encuentran distribuidas por igual sobre un círculo; es decir, si la probabilidad de que un punto x_n elegido al azar entre los puntos de una sucesión se encuentre en una dirección cualquiera dada es la misma para todas las direcciones. La propiedad anterior desempeña un papel importante en teoría de números, por lo que el trabajo de Mendès France y Dekking tiende un puente entre aquélla y una serie de ideas geométricas muy curiosas. Su teorema puede utilizarse también en sentido inverso: el conocimiento de que la secuencia está equidistribuida demuestra que la curva es superficial; el conocimiento de que la curva es superficial demuestra que la secuencia está equidistribuida. (Advertencia: de ordinario, ni una ni otra propiedad resultan fáciles de establecer).

La termodinámica de las curvas $G(x)$, un poco complicada, ha sido relegada al recuadro 2.

En particular, resulta posible aplicar las ideas del recuadro 2 a las curvas $G(x)$ construidas a partir de sucesiones $x = (x_n)$ como se ha descrito arriba, e investigar la termodinámica de las sucesiones.

A Jaco Plantillas se le ocurrió una idea casi descabellada. *Las curvas de temperatura cero han de ser rectas...* "¡Oye, Warthog, te voy a decir por qué hay que utilizar líneas rectas. ¡Eso sí que son curvas *frías*!" Pero Warthog no se dejó impresionar por un juego de palabras tan malo y respondió con un desafío. "Jaco, me dijiste que analizase lógicamente este proyecto, ¿verdad? Bueno, pues a ver si tú eres lógico. Apuesto a que no eres capaz de averiguar la sucesión que estoy utilizando para construir esta curva. Si tengo razón, dejas de darme la carga, ¿vale? ¡Si me equivoco, lo levanto todo y pongo en su lugar un bonito trazado de líneas rectas!"

"¡Venga ya, Warthog! ¡Hay infinitas posibilidades! No tengo la menor probabilidad!"

"Bueno, hombre, te daré una pista. Es una de las secuencias $G(an^2)$ dadas por $x_n = an^2$ con a constante. ¡Lo único que tienes que hacer es calcular la constante!" Esta familia concreta de sucesiones tiene profundas conexiones con la teoría de números (como veremos), por lo que la geometría de las curvas asociadas debería tener propiedades interesantes (como así es).

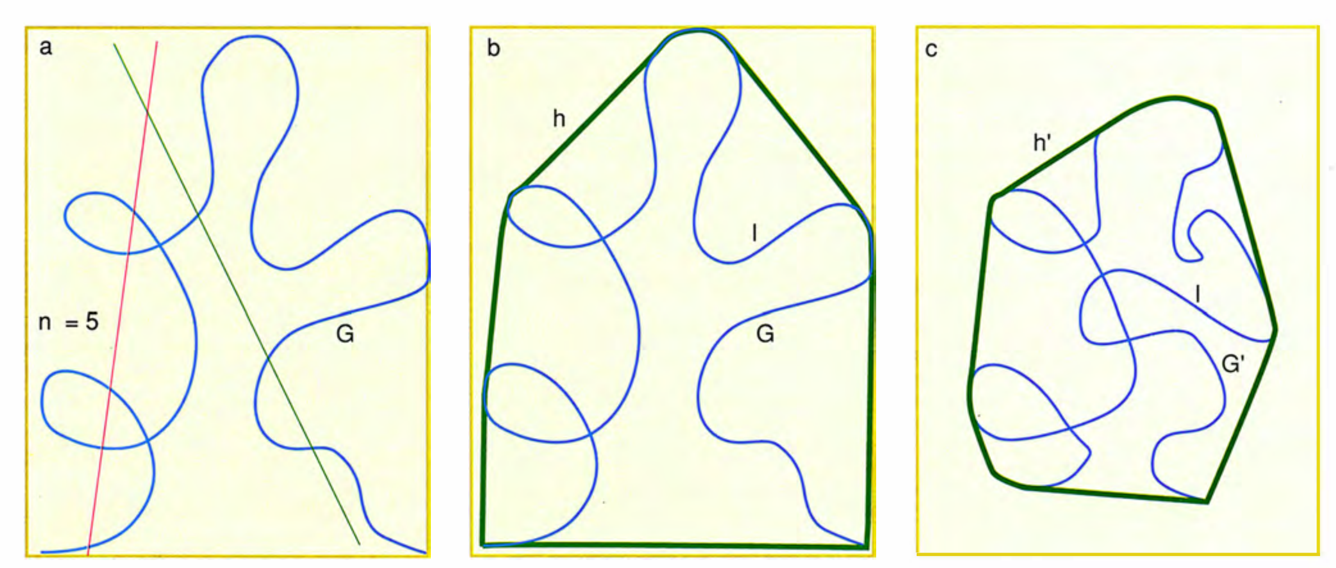
"Pero todavía hay una infinidad de...", comenzó a decir Jaco. Y se interrumpió. Había aquí una posibilidad real —su única oportunidad, en realidad— de impedir que Warthog echase a perder todo el aparcamiento. Era una oportunidad muy escurridiza, pues el problema seguía siendo realmente difícil, pero no cabía duda de que era una oportunidad. La mente de Jaco subió de revoluciones y conectó el "turbo". La dificultad del problema de Warthog estriba en que los diferentes valores de a producen una notable variedad de curvas [*figura 9*]. (Prescíndase por el momento de los rótulos de "renormalización" que hay en la figura; los explicaremos más adelante).

Cuando hay que afrontar una complicada gama de posibilidades, lo mejor es empezar con casos sencillos y ver si salen a la luz principios generales. El caso más fácil se presenta cuando a es el recíproco $1/N$ de un entero N. Las curvas $G(n^2/N)$ correspondientes tienen una estructura espiral muy simple [*figura 10*], que se asemeja mucho a la *espiral de Cornu* de óptica. Y no se trata de un accidente: el proceso de trazado de $G(n^2/N)$ puede ser visto como una aproximación discreta a una espiral de Cornu. Otros valores de a producen curvas más complejas; pero todas ellas muestran, entre sus características, unas estructuras espirales reiteradas, a modo de volutas o *espirilos*.

El aparcamiento era un laberinto de espirilos. ¿Podrían éstos darnos alguna pista?

Jaco tuvo que averiguar la causa de aparición de los espirilos. Examinemos el caso particular $a = 1/N$, donde N es un entero bastante grande. Fijémonos en la n-ésima *diferencia de fase*, que es el ángulo entre las direcciones de los segmentos n-ésimo y $(n+1)$-ésimo del polígono $G(n^2/N)$. Medido en radianes, esta diferencia es igual a $\{(n + 1)^2 - n^2\}2\pi/N = (2n + 1)2\pi/N$. Cuando n es pequeño respecto a N, la diferencia de fase también lo es, y por ello los segmentos apuntan casi en la misma dirección, produciendo una curva suave. Cuando la diferencia de fase llega a hacerse mayor que $\pi/2$ (un ángulo recto), los segmentos se repliegan unos sobre otros, llenando un borrón. Al ir n aproximándose a $N/4$, cada segmento casi da marcha atrás sobre su predecesor. Cuando n rebasa el valor $N/4$, el espirilo empieza a desarrollarse otra vez, y cuando n llega a $N/2$, se

7. (a) *Nessie, el monstruo del lago Ness,* $G((\log n)^4)$. (b) *Los arcos,* $G(n^{3/2})$. (c) *Toro,* $G(n^3/1013)$. (d) *El coso,* $G(n^3/1002)$. (e) *La hormiga ebria,* $G(\mathrm{sen}(n^{3/2}))$.



8. (a) *La recta roja interseca a la curva azul en el estado 5; la verde lo hace en el estado 3.* (b) *La cápsula convexa de una curva.* (c) *La misma longitud de curva confinada en una cápsula convexa menor experimenta una presión más elevada.*

Recuadro 2 La termodinámica de las curvas

La termodinámica es el estudio de las propiedades estadísticas de los gases; se ocupa de magnitudes ya clásicas, como la temperatura T, la presión P, el volumen V y la entropía S. La ley de los gases perfectos enuncia que $PV = RT$, siendo R una constante; esta ley es válida a temperaturas elevadas. ¡Nos proponemos buscar análogas de las ideas anteriores para curvas, en lugar de gases!

Sea G una curva de longitud finita. Tomemos en el plano una línea recta arbitraria; cortará a G en cierto número de puntos, n_K (a menos, excepcionalmente, que G contenga un segmento rectilíneo que yazga exactamente sobre K). Decimos que K interseca a G en el *estado* n_K (*figura 8a*). En termodinámica, la entropía de un sistema se define como

$$-[p_1 \log p_1 + p_2 \log p_2 + ...]$$

siendo p_n la probabilidad de que el sistema se encuentre en el estado n. En el caso de curvas, tomamos como p_n la probabilidad de que una recta elegida al azar interseque a G en el estado n; es decir, p_n = probabilidad de que $n_K = n$. Para dar sentido a esta definición precisamos de una definición adecuada de probabilidad en el espacio de todas las rectas K. Resultados debidos a Hugo Steinhaus permiten llegar a una fórmula explícita para la entropía de una curva, como sigue. Sea l la longitud de G y sea h la longitud de su *cápsula convexa* (también llamada envolvente convexa), que es la mínima curva convexa que la contiene (*figura 8b*). La entropía de la curva G es

$$S = \log(2\,l/h) + \frac{\beta}{e_\beta - 1}$$

donde

$$\beta = \log[2\,l/(2\,l - h)].$$

Tanto si la analogía tiene sentido como si no, la magnitud S constituye una propiedad bien definida de la curva G, y ello permite tomar la fórmula como *definición* de entropía. En la termodinámica tradicional, la *temperatura* T es la recíproca de la cantidad β; tenemos, pues:

$$T = \{\log[2\,l/(2\,l - h)]\}^{-1}$$

Llevemos la analogía un poco más lejos, definiendo el *volumen* V de la curva como su longitud,

$$V = l,$$

y la *presión* P mediante

$$P = h^{-1}$$

Las definiciones anteriores resultan geométricamente atractivas: el volumen (medida tridimensional) de un gas es reemplazado por la longitud (medida unidimensional) de una curva; cuanto menor sea la cápsula convexa tanto más comprimida se hallará la curva en su interior, y más elevada, por tanto, la presión. A partir de las definiciones, la "ley de los gases" que relaciona estas magnitudes es

$$2PV = (1 - e^{-1/T})^{-1}$$

Para temperaturas T elevadas, está fórmula produce

$$PV = 1/2\;T,$$

¡análoga para curvas, con "constante de los gases" $R = 1/2$, de la ley de los gases perfectos!

En el caso de curvas de longitud infinita pueden definirse magnitudes similares a partir de límites adecuados de segmentos finitos de las curvas. En particular, la entropía de una de tales curvas G se define como

$$\lim_{r \to \infty} \frac{\log(2l_r/h_r)}{\log_r}$$

siendo l_r la longitud de un segmento finito G_r de G y siendo h_r la longitud de su envolvente convexa.

La analogía produce frutos interesantes. La entropía de una línea curva es siempre positiva; las únicas líneas de entropía nula son las rectas. Una curva algebraica, definida por un polinomio de grado d, tiene como máximo una entropía de $1 + \log d$. Esta entropía parece constituir una medida natural de la *complejidad* de la curva. Y también esta noción posee sentido: en teoría de información, la entropía, cual ha sido definida arriba, corresponde a la cantidad de información (observemos que hay problemas con los convenios de signo, y que para algunos autores la entropía es información *negativa*). Así pues, la entropía o complejidad de una curva puede ser interpretada de modo informal como la cantidad de información necesaria para especificarla.

De las ecuaciones anteriores se deduce que la temperatura T de una curva es cero si y solamente si la curva es una línea recta; a la temperatura del "cero absoluto" solamente existen líneas rectas. Cuanto más caliente se torna una curva, tanto más sinuosa puede ser.

Como es evidente, las anologías anteriores no pasan de ser aproximativas. Cualquier estudio serio ha de basarse en las definiciones rigurosas.

estira por completo, tras lo cual comienza a formarse un espirilo nuevo. Al cabo de N etapas el proceso entero vuelve a empezar. Hay cuatro casos, dependientes del valor de N (mód 4); esto es, dependiendo de que N sea de la forma $4m$, $4m + 1$, $4m + 2$ o $4m + 3$. Los vemos ilustrados en la figura 10.

La teoría de las *sumas de Gauss* puede darnos la explicación de este fenómeno. Una suma de Gauss "completa", cuya expresión más sencilla es en notación compleja, adopta la forma

$$\sum_{n=0}^{N} e^{2\pi i n^2/N} \qquad (*)$$

donde la sigma mayúscula denota sumación y donde i es raíz cuadrada de -1. Se sabe que su valor es

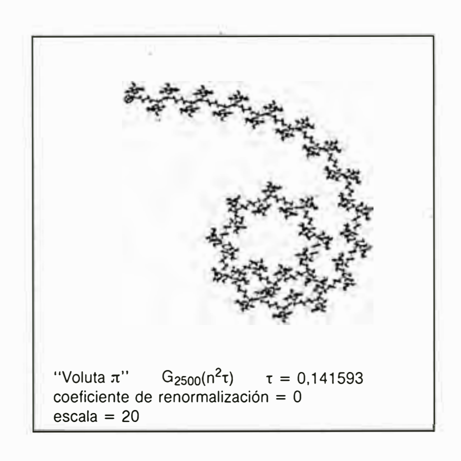
$$2\,(1 + (-i)^N)\;\frac{1+i}{4}\sqrt{N}. \qquad (**)$$

Podemos imaginar que el plano donde se está trazando la curva $G(n^2/N)$ es el plano complejo; hallamos entonces que el r-ésimo vértice de la curva es la suma parcial de Gauss obtenida de la fórmula (*) precedente al cambiar el límite superior de sumación de $n = 0$ a r. Supongamos que la división entera de r entre N tenga cociente p y resto q: entonces $r = pN + q$ y la suma de Gauss hasta r términos es la que lleva hasta q términos, más p sumas de Gauss completas. Es posible ver que (**) es responsable de las diversas periodicidades y simetrías de la figura 10. La conducta cualitativa depende sólo de N (mód 4), porque $(-i)^N$ depende exclusivamente de N (mód 4). De hecho,

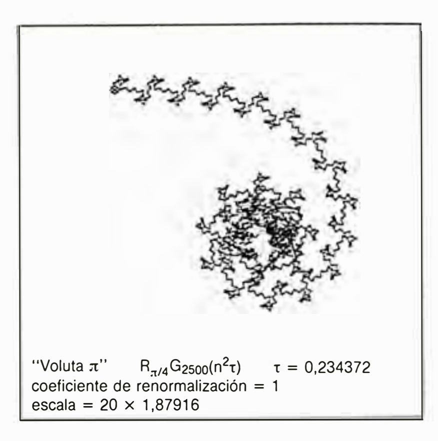
$$(-i)^N = \begin{cases} 1 \text{ si } N \equiv 0 \text{ (mód 4)} \\ -i \text{ si } N \equiv 1 \text{ (mód 4)} \\ -1 \text{ si } N \equiv 2 \text{ (mód 4)} \\ i \text{ si } N \equiv 3 \text{ (mód 4)} \end{cases}$$

El caso inmediatamente más difícil es que a sea un número racional, $a = p/q$, siendo p y q enteros primos entre sí. Estas aproximaciones periódicas producen estructuras espirales en la curva, de forma muy parecida al caso $a = 1/N$ precedente. La figura 11 muestra lo que sucede para las fracciones $p/7$, con $p = 1, 2, 3, 4, 5, 6$.

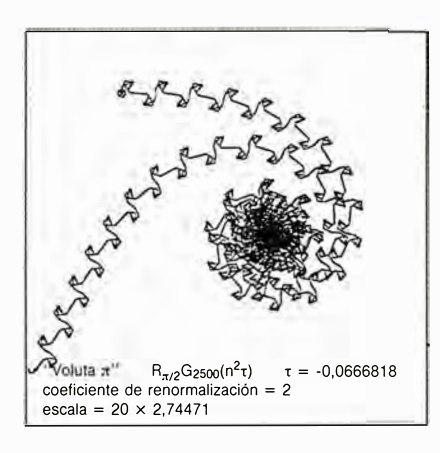
A continuación, Jaco se dio cuenta de que podía servirse de la estructura de $G(n^2p/q)$ correspondiente a valores de a para explicar algunas de las características observadas para valores irracionales de a: los primeros estadios de la curva $G(an^2)$ se parecían de cerca a los de $G(n^2p/q)$. Jaco po-



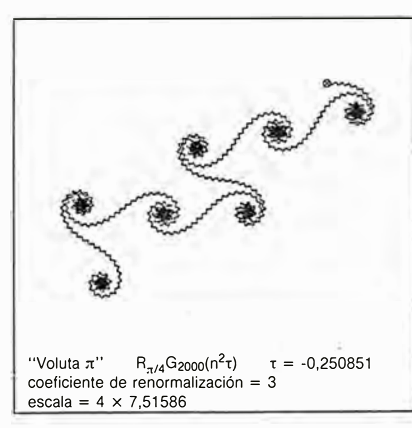
"Voluta π" $G_{2500}(n^2\tau)$ $\tau = 0,141593$
coeficiente de renormalización = 0
escala = 20



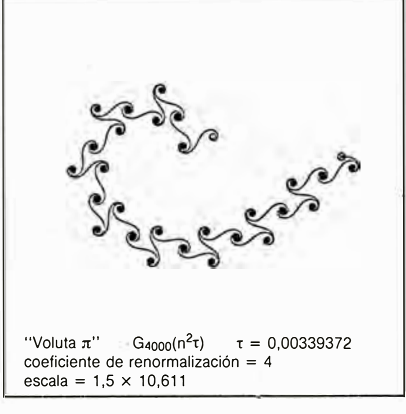
"Voluta π" $R_{\pi/4}G_{2500}(n^2\tau)$ $\tau = 0,234372$
coeficiente de renormalización = 1
escala = 20 × 1,87916



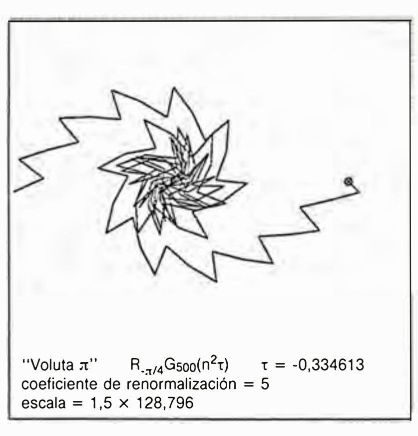
"Voluta π" $R_{\pi/2}G_{2500}(n^2\tau)$ $\tau = -0,0666818$
coeficiente de renormalización = 2
escala = 20 × 2,74471



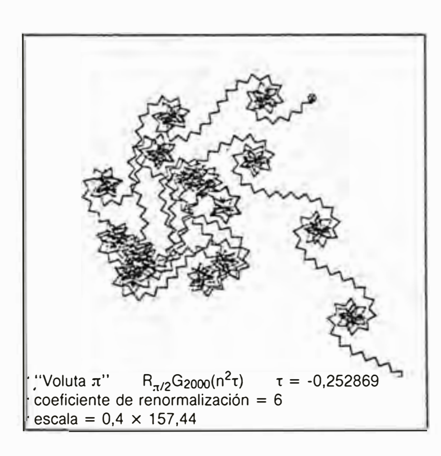
"Voluta π" $R_{\pi/4}G_{2000}(n^2\tau)$ $\tau = -0,250851$
coeficiente de renormalización = 3
escala = 4 × 7,51586



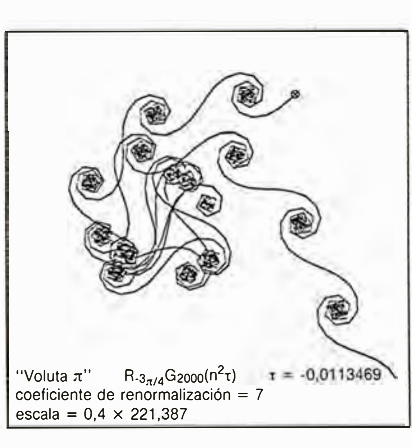
"Voluta π" $G_{4000}(n^2\tau)$ $\tau = 0,00339372$
coeficiente de renormalización = 4
escala = 1,5 × 10,611



"Voluta π" $R_{-\pi/4}G_{500}(n^2\tau)$ $\tau = -0,334613$
coeficiente de renormalización = 5
escala = 1,5 × 128,796



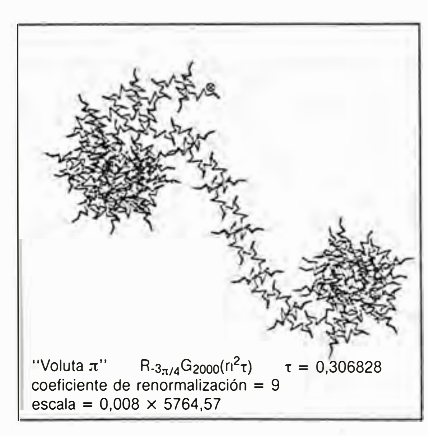
"Voluta π" $R_{\pi/2}G_{2000}(n^2\tau)$ $\tau = -0,252869$
coeficiente de renormalización = 6
escala = 0,4 × 157,44



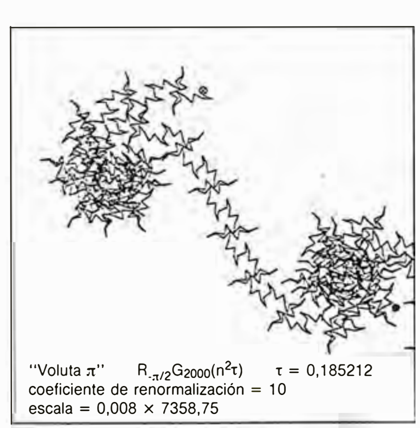
"Voluta π" $R_{-3\pi/4}G_{2000}(n^2\tau)$ $\tau = -0,0113469$
coeficiente de renormalización = 7
escala = 0,4 × 221,387



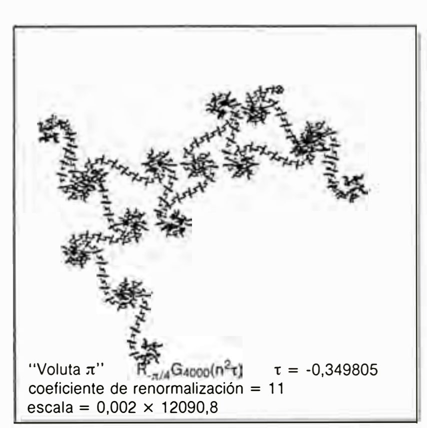
"Voluta π" $R_{-\pi}G_{2000}(n^2\tau)$ $\tau = 0,0324963$
coeficiente de renormalización = 8
escala = 0,04 × 1469,6



"Voluta π" $R_{-3\pi/4}G_{2000}(n^2\tau)$ $\tau = 0,306828$
coeficiente de renormalización = 9
escala = 0,008 × 5764,57

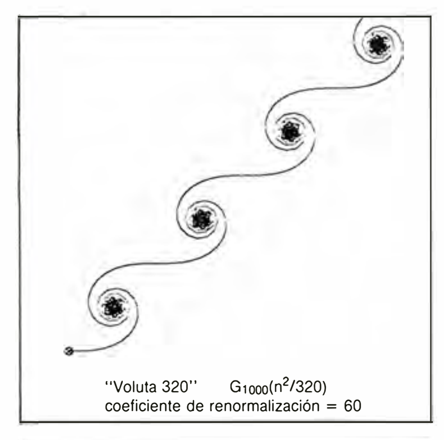


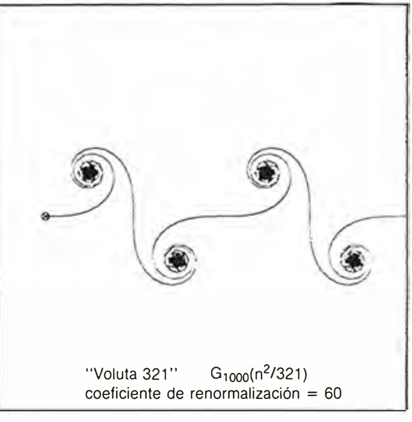
"Voluta π" $R_{-\pi/2}G_{2000}(n^2\tau)$ $\tau = 0,185212$
coeficiente de renormalización = 10
escala = 0,008 × 7358,75

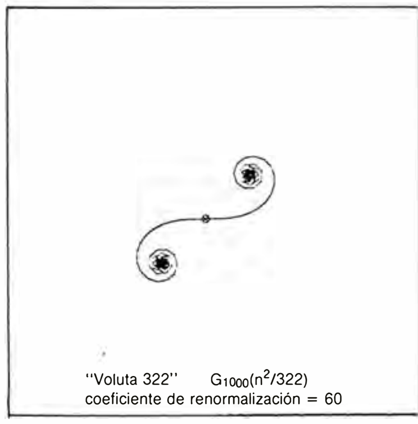


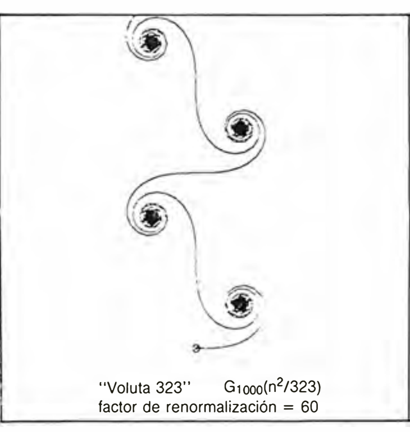
"Voluta π" $R_{-\pi/4}G_{4000}(n^2\tau)$ $\tau = -0,349805$
coeficiente de renormalización = 11
escala = 0,002 × 12090,8

9. Doce curvas de la forma $G(an^2)$.

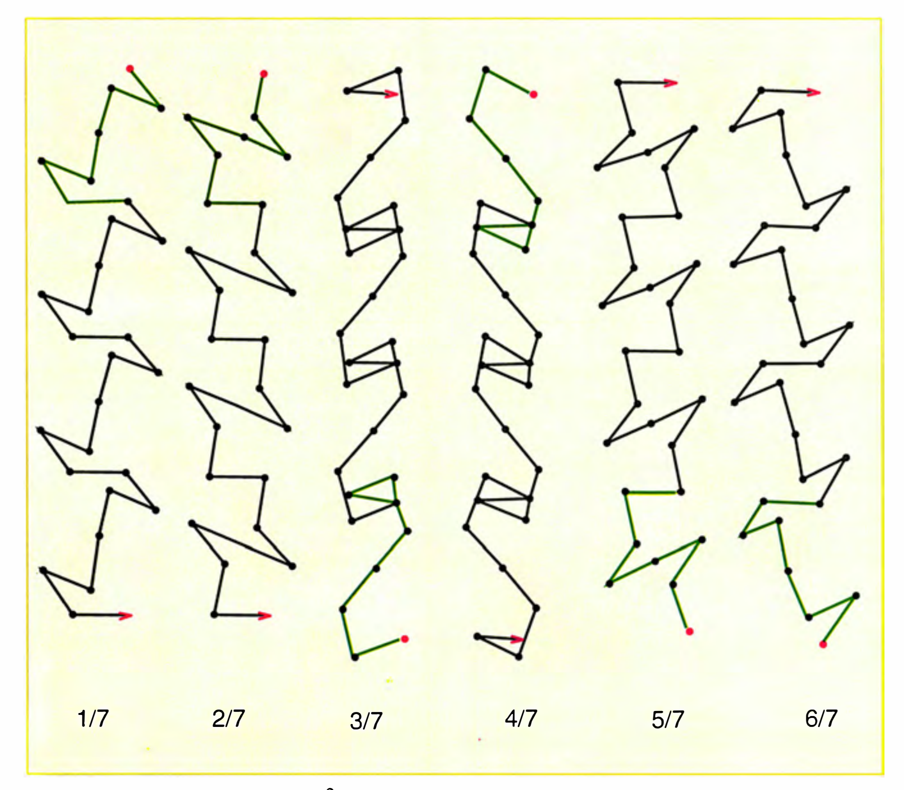








10. La forma de las curvas $G(n^2/N)$ recuerda a las espirales de Cornu. Sus simetrías dependen de n (mód 4). Se muestran cuatro casos representativos.



11. Todas las curvas $G(pn^2/7)$ correspondientes a p = 1, 2, 3, 4, 5, 6 exhiben tramos repetidos de longitud 7, el primero de los cuales se destaca en verde. Las curvas correspondientes a p y a 7-p son idénticas, excepto por un giro de 180 grados (por simetría central).

dría sacar partido de esta idea para conjeturar qué valor de *a* estaba utilizando Sandy Warthog. ¿Qué aproximaciones racionales puede ver el lector en la curva de Warthog de la figura 1?

Para facilitar la tarea, hemos ampliado la parte inicial de esa curva (la porción en rosa de la figura 1), ampliación que vemos en la figura 12. Los zigzags son complicados y los lados tienden a superponerse, por lo que daré un par de indicios. Hay una poligonal de 7 lados que va repitiéndose aproximadamente, lo que corresponde a una aproximación racional de la forma *p*/7 para un cierto *p*. Al comparar la forma de esta poligonal con la de la figura 11 vemos que *p* tiene que ser congruente a 1 o a 6 módulo 7, por lo que la aproximación racional es una de las 1/7, 6/7, 8/7, 13/7, 15/7, 20/7, 22/7, 27/7, 29/7... ¿No hay nada en esta lista que le resulte familiar? Para confirmar nuestra sospecha, la figura 12 muestra también otra estructura mayor que va casi repitiéndose, cuya longitud es el insólito entero 113. ¿Conoce el lector algún racional interesante de la forma *p*/113?

El valor de *a* es π, desde luego. Entre las aproximaciones racionales de π son especialmente notables la de 22/7 y la de 355/113. Parece, pues, que la curva de Warthog va a ser $G(\pi n^2)$. Los zigzags repetidos reflejan la aproximación 22/7; los mini-espirilos mayores proceden de la 355/113. La teoría de aproximaciones racionales propia de la teoría de números queda así relacionada con la geometría de la curva $G(an^2)$ correspondiente.

"¡Estás utilizando el valor $a = \pi$!", gritó Jaco, exultante de triunfo.

La cara larga de Warthog reflejaba su desánimo. "¿Cómo has podido...?"

"¡He ganado! Y ahora, líbranos de esas absurdas volutas y hazme una preciosa parrilla de líneas rectas, como prometiste!"

Warthog, pintado en el rostro el esfuerzo por contener la ira, se puso a trabajar.

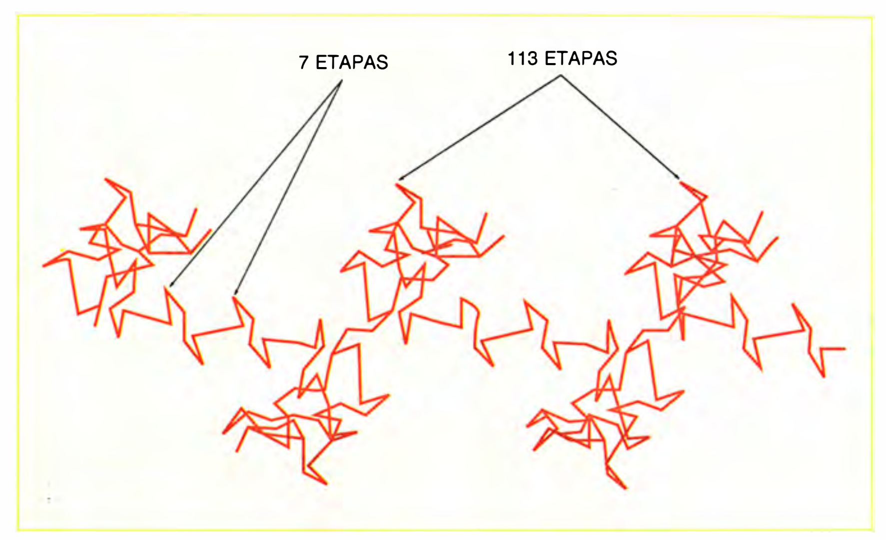
Las periodicidades aproximadas que condujeron a Jaco hasta la solución pueden ser ulteriormente investigadas merced a una idea tomada de la física. Al mirar desde una distancia suficiente la curva $G(\pi n^2)$ resultan eficazmente suprimidas las volutillas correspondientes a la aproximación racional 22/7 y sólo vemos la espiral 355/113. Puede demostrarse que segmentos iniciales largos de la curva $G(an^2)$ resultan bien aproximados por segmentos iniciales más cortos de la curva $G(bn^2)$, siendo *b* una constante

diferente. De hecho, podemos suponer que a se encuentra comprendido entre -1/2 y 1/2, porque la adición o sustracción de un entero k a la constante a no tiene efectos sobre $G(an^2)$. Si tomamos

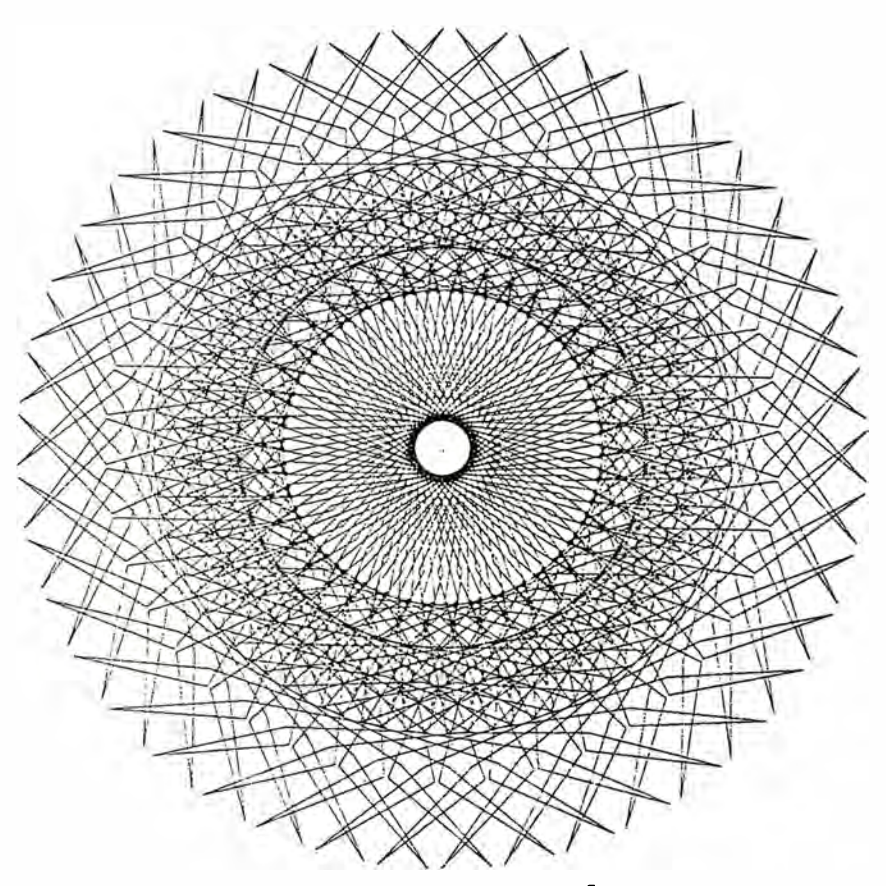
$$b = : \{1/2a\},$$

donde $\{x\}$ denota la mantisa o parte decimal de x, podemos aproximar los N primeros segmentos de $G(an^2)$ por los $2aN$ primeros segmentos de $G(bn^2)$. Es preciso corregir la escala de la figura correspondiente a $G(bn^2)$ en un factor adecuado y hacerla girar un ángulo recto. El resultado anterior fue demostrado por los físicos Michael Berry y J. Goldberg en 1988; tiene aplicaciones en mecánica cuántica y en difracción óptica. Es un proceso conocido por *renormalización* y tuvo su origen en la teoría cuántica, aunque es preciso señalar que los matemáticos Godfrey Hardy y John Edensor Littlewood aplicaron en 1914 una versión más débil de la misma idea para estimar los valores de las sumas parciales de Gauss.

La figura 9 muestra sucesivas etapas de la renormalización de $G(\pi n^2)$. Los parecidos entre fases cercanas resultan a veces evidentes; por ejemplo, las tres primeras figuras tienen formas muy similares. Cuando los parecidos son menos obvios, ello se debe a que ha cambiado la escala del dibujo; así lo indica el *primer* número que sigue a la palabra "escala". El segundo indica el factor de escala que interviene en el proceso de renormalización. Por ejemplo, en las figuras quinta y sexta se utiliza la misma escala de dibujo (1,5), aunque combinada con distintas escalas de renormalización (10,611 y 128,796). Las figuras cuyo primer número de escala es el mismo tienen formas directamente comparables.



12. Primer plano del recuadro de la figura 1 (curva de Warthog), que muestra estructuras cuasi-repetitivas de longitudes 7 y 113.



13. La venganza de Warthog, $G(n^7/1050)$.

Dos días más tarde, la curva $G(\pi n^2)$ había sido borrada del aparcamiento, y Warthog se disponía a trazar la parrilla rectilínea prometida. El arquitecto municipal casi fulminó con la mirada a Jaco. "Sigo pensando que deberíamos haber dejado la decisión en manos de Warthog! ¡Es brillante, de una imaginación excepcional!"

Jaco le interrumpió. La nueva distribución [*figura 13*] no parecía correcta del todo. "¡Eh! ¡Warthog"!", gritó consternado. "¿Qué haces ahora? ¡Tenía entendido que ibas a producir una parrilla de líneas rectas!"

Sandy Warthog alzó la mirada de su trabajo. "Y eso es, precisamente. Una parrilla definida por líneas rectas", replicó.

"¡Sí, pero tendrían que tener el tamaño de un coche!"

Warthog movió la cabeza tristemente. "Es un poquito tarde para advertírmelo, Jaco. No; ya me he pasado la noche en blanco preparando para ti este diseño. ¡Pensé que te iba a encantar! ¡No hay agradecimiento en este mundo!"

La sonrisa del arquitecto municipal era tan grande que por poco se le caen las orejas en la boca.

Jaco Plantillas se puso a sollozar, quedamente.

Nota: Estos *Juegos matemáticos* se basan en un artículo de Ross Moore y Alf van der Poorten. Las ilustraciones tomadas del mismo se reproducen con la debida autorización.

Libros

Redes tróficas, acústica musical, cartografía y ciencia francesa

Ramón Margalef, Carmen Rusiñol, Francesc Castelló y Luis Alonso

COMMUNITY FOOD WEBS. DATA AND THEORY, por Joel E. Gohen, Frédéric Briand y Charles M. Newman. Biomathematics, volumen 20. Springer-Verlag; Berlín, 1990.

El estudio de las redes alimentarias o tróficas es fundamental en ecología y tiene fuerte tradición. Todos recordamos de los textos elementales las secuencias lineales de hierba, conejo, zorro, o bien hierba, oruga, pájaro insectívoro y halcón. O, para citar un modelo marino, la cadena fitoplancton, copépodos, pequeños crustáceos, peces o moluscos, calamares y cachalote. Tales relaciones se suelen ilustrar con diagramas expresivos de un flujo de materiales, con los que circula también energía, y se pueden estudiar desde puntos de vista bastante diversos. En este libro se trata más bien de describir cuantitativamente las regularidades empíricas que se deducen del examen comparativo de conjuntos de redes, pero haciendo referencia solamente a números e identidades de especies. No se considera la circulación de materiales caracterizables, elementos químicos, moléculas o isótopos definibles, y tampoco se hace referencia a problemas de tipo termodinámico.

Los distintos autores, solos o en diferentes combinaciones o permutaciones, desarrollan diversas partes del libro. El capítulo primero introduce los temas de las redes tróficas en general, de la estructura de las comunidades, y debate cuestiones terminológicas. En él se presentan cinco leyes o generalizaciones empíricas, que constituyen el tema en torno al cual gira la mayor parte del libro. En el segundo capítulo, por Briand y Cohen, se examinan las regularidades que empíricamente derivan del examen de redes ecológicas. El capítulo tercero, al que contribuyen los tres autores, con intervención, además, de Z. J. Palka, trata de desarrollar una teoría que contribuya a explicar las propiedades estadísticas de las redes. La teoría pretende ser totalmente estocástica. No considera limitaciones y condicionamientos físicos asociados a la transferencia de energía que, por cierto, son la razón de ser de las redes tróficas. Expresamente se excluye cualquier consideración de las restricciones impuestas por la termodinámica. El cuarto capítulo consiste en un catálogo de 113 redes tróficas extraídas de trabajos publicados por diversos autores. Las redes se presentan de manera unificada, en forma de matriz, con todas las especies en filas y columnas, y, en las intersecciones, ceros o unos. Los unos significan que existe una relación de tipo depredador/presa, con el depredador en el encabezamiento de la columna y la presa al principio de la línea. La diagonal no contendrá más que ceros, excepto en los casos de canibalismo. Este es el material de base.

Cada ecosistema se proyecta en forma de una red, cuyos nudos corresponden a "especies tróficas", y cuyos hilos o conexiones siempre se hallan en número inferior al máximo posible. Es decir, en una comunidad nunca se realizan todas las interacciones tróficas que serían posibles. La red trófica se orienta y extiende entre una base de productores primarios (plantas) que no comen a otros organismos, y un nivel culminante de depredadores, que ya no tienen otros depredadores por encima de ellos. Los heterótrofos osmótrofos, como bacterias y hongos, no hallan cabida en estos esquemas, ajenos al interés desarrollado recientemente acerca de las interacciones tróficas entre bacterias y pequeños protozoos. Entre la base y el nivel más alto de la red, se hallan numerosas especies que se dejan ordenar en cierto número de pisos o niveles. La regularidad numérica consiste en que las especies basales vienen a ser el quinto del total, las culminantes cerca del tercio, y las intermedias alrededor de la mitad del número total de especies en la red. Las cadenas lineales englobadas en la red son cortas, lo común es que contengan 4 o 5 especies; la más larga de las 113 redes examinadas tenía 10. Yendo hacia arriba, los niveles superiores están representados por animales cada vez más corpulentos y más escasos, exceptuando las cadenas de parásitos (e hiperparásitos), mencionadas sólo de paso. Superpuesta a la red, otros ecólogos han percibido una cascada de materiales y energía en su fluir a través del ecosistema.

Se buscan las regularidades observables en las redes, sometiéndolas, eventualmente, a un análisis estadístico más profundo. Ya se ha mencionado cómo el número total de especies se puede repartir en tres grupos. Cada nudo, o sea, cada especie, tiene cierto número de depredadores (excepto las especies de la cima), y también cierto número de presas, excepto las especies basales o productores primarios. Se deduce que cada especie se relaciona, en promedio, con 4 especies depredadoras y 3 especies presas. Puesto que las especies tróficas inferiores son casi siempre colectivos (los "proletarios", como el "fitoplancton" y la "hierba"), mientras que los animales de pluma o pelo (los "capitalistas") se suelen dar con sus nombres y apellidos, es difícil aceptar tal regularidad en la forma presentada. Las redes se ven de manera diferente si se miran desde arriba, con el mayor interés centrado en los depredadores ("sink food webs"), o bien desde la base productora ("source food webs").

El número y disposición de las conexiones entre especies es un tema importante. Aunque no se debate especialmente la asimetría o direccionalidad de las conexiones, que se da por supuesta, se señala que, con la excepción de casos de canibalismo, los ciclos cerrados son raros, lo cual, por otra parte, se comprende al mirar a los sistemas ecológicos como sistemas físicos. Para cada especie, número de depredadores y de presas tienden a ciertos valores medios. Más general e importante es que el número de enlaces operativos sobre toda la red sea aproximadamente como dos veces el número de especies. Esto corresponde a una conectividad laxa de las redes. Si las redes estuvieran saturadas de conexiones, con lo que serían sistemas rígidos, el número de conexiones sería $S(S-1)/2$, siendo S el número de especies. Otros autores llaman conectancia (C) a la relación entre el número real de conexiones L y su número posible, $2L/S(S-1)$, y sugieren que el número total de especies multiplicado por la conectancia, SC, queda entre 2 y 6 (o más). Por vías diversas se llega a la conclusión de que la conectividad tiende a ser in-

termedia, quizá siempre un poco por encima de la media, lo cual tiene otra reflexión en la jerarquía, evidente en redes tróficas, un concepto que este libro sólo menciona de paso.

Se dedica considerable atención a lo que podríamos llamar relación entre la extensión de las redes según la dimensión vertical, desde los productores primarios hasta los depredadores supremos, y la existencia de adherencias laterales o transversas. Sin embargo, los conceptos de redes "intervalo" y "no intervalo" quizá resultarían más claros sin la pretensión de no abandonar el campo empírico y descriptivo. El ecólogo medio tiende a ver la relativa exclusión de relaciones triangulares –con la consecuencia de la rebaja de la conectividad por lo menos hasta 2/3 de la máxima–, como uno de los resultados de la dinámica de la competencia. Se comenta la cuestión de los nichos ecológicos y de su dimensionalidad. El deseo de operar con relaciones de intervalo conduce a postular una sola dimensión para los nichos. Hay que hacer notar que puesto que se habla, en general, de "especies tróficas" y la descripción de éstas coincide muchas veces con la de nichos, la discusión puede resultar ambigua. El concepto de nicho renace continuamente en contextos "estructuralistas".

Las regularidades estudiadas se fundamentan y analizan mediante diagramas de puntos basados en la colección de 113 redes. Se suelen expresar por simples regresiones. Algunos aspectos se analizan ulteriormente con mayor aparato matemático, que resulta a veces ciertamente interesante, aunque no suele sugerir vías posibles a modelos físicos. Las correlaciones con frecuencia dependen de la simple estructura general de los datos, así como de las limitaciones naturales de una red o cadena. Claro que uno puede quedar algo perplejo al leer que el número medio de enlaces o conexiones en una red es aproximadamente proporcional al número de especies, con un coeficiente de proporcionalidad de 1,8559 y una desviación normal de 0,0740, o también que, si el muestreo ha sido bueno, las redes son "intervalo", es decir, los depredadores se pueden alinear en una dimensión.

Se han propuesto diversas explicaciones para la longitud limitada de las cadenas tróficas: la energía que entra por la base (un tigre no puede vivir en una isla muy pequeña), los requerimientos de la estabilidad dinámica que sólo permiten alargar mucho las cadenas en los ambientes de más constantes. Aquí (Briand) se supone, además, que las redes pueden ser más largas en aquellos espacios que se desarrollan según tres dimensiones y no solamente en dos. Por supuesto, no hay comunidades con sólo dos dimensiones: se quiere decir simplemente que el eje vertical es relativamente corto, como en una pradera, o el lecho de un río, en comparación con la selva o con el plancton; es cuestión de escala. La longitud total de las cadenas se encuentra más determinada por la dimensionalidad de las comunidades que por la estabilidad o constancia de condiciones; la producción primaria vendría en tercero y último lugar.

El tercer capítulo trata de proporcionar una fundamentación teórica, y muestra síntomas de lo que se ha llamado "envidia de la física", con repetida referencia, aparentemente –y amargamente– jocosa al "caballo esférico" de Katchalski. Hay un buen punto de partida en la crítica de May a las pretendidas relaciones entre diversidad y estabilidad, resuelta en la consideración de las Eigenvalues de matrices, según Wigner, de los ecosistemas, de las que se deduce que una conectancia excesiva haría inviable al sistema. Señalan que la asimetría de las relaciones es importante. Pero la aproximación utilizada procura mantenerse aparte de modelos teóricos, especialmente de los físicos y ecológicos. Buscan también inspiración en los grafos al azar de Erdös y Rényi que se pueden utilizar como base sobre la que analizar las cascadas en las redes. Algunas de estas discusiones van acompañadas de desarrollos matemáticos que, a menudo, son interesantes.

La crítica más seria que debe hacerse a este libro es que se basa en "redes tróficas" obtenidas de las páginas de la literatura de la especialidad, que en número de 113 se reproducen de manera uniforme en el capítulo último del libro, lo cual resulta muy útil, a la vez que devastador de todo el texto precedente. Basta pensar que el número total de "especies" en cada uno de estos ecosistemas contrahechos nunca excede de 50. Es habitual que en cada ecosistema se den los nombres de algunas especies particularmente notables (básicamente vertebrados), pero muchas "especies tróficas" de los primeros niveles están simplemente definidas como "detritus" –se supone que incluyen los pequeños organismos que viven en ellos–, "plancton y detritus", "insectos de marisma", "materia orgánica", "poliquetos e isópodos", etc. Por otra parte hay especies biológicas que, en el curso de su vida, son parte de diferentes "especies tróficas", y esto no se toma en consideración adecuada.

Si, a pesar de estas deficiencias, se observan algunas regularidades, es que éstas son muy robustas o triviales, aunque a veces reflejan más las idiosincrasias o el condicionamiento común de los descriptores de redes que la naturaleza misma. Existen, indudablemente, relaciones alométricas entre una serie de propiedades cuantificables de toda comunidad, puesto que el número de niveles distinguibles, el de conexiones entre especies, etc., nunca crecen tan rápidamente como el número total de especies implicadas. (R. M.)

ACÚSTICA MUSICAL. Selección e introducción de Joaquim Agulló. Prensa Científica, S.A.; Barcelona, 1989.

Esta recopilación de 11 artículos de *Investigación y Ciencia* se divide en tres partes: vibraciones libres, vibraciones autoexcitadas y el ordenador en el ámbito acústico. Digamos de entrada que nos hallamos ante una magnífica ejemplificación de la experimentación acústica y tímbrica más reciente.

En el prólogo, Agulló considera de forma suscinta la historia de la acústica relacionándola con la experimentación instrumental. A partir de esta perspectiva, selecciona y vertebra los artículos. El sistema dual de experimentación sonora ha posibilitado el progreso tímbrico y armónico ulterior hasta desembocar en una interrelación multidisciplinaria en el ámbito de la música electrónica.

La complejidad sonora que poseen los instrumentos tradicionales estriba en su espectro tímbrico. No poseen un sonido simple como el diapasón, sino que se da una suma acumulada de otros sonidos parciales que se agregan al fundamental: los armónicos. El timbre depende de la distribución y número de armónicos sujetos a unas leyes acústicas sumarias que a su vez representan el funcionamiento del sistema que, durante más de tres siglos, privó en la música occidental: el sistema tonal. Los instrumentos tradicionales se concibieron y crearon de acuerdo con este sistema.

"Vibraciones acopladas de las cuerdas del piano" es un artículo que refleja la orientación de la investigación hacia la capacidad tímbrica de este instrumento. La utilización de dos o tres cuerdas afecta también a su calidad sonora. G. Weinreich aborda los pequeños desafinamientos o deficiencias de frecuencia que contribuyen a la sonoridad del piano; estudia otras

posibilidades de modificación sonora debidas a las cuerdas dobles o triples; compara el resultado si el piano se hubiera construido con una sola cuerda. Analizando la resonancia, distingue dos tipos de sonidos: inmediato y resonancia. Sonidos típicos de su timbre, que incidirán poderosamente en la creación de un estilo formal propio distinto del xilófono: el estilo sostenido o "cantabile" que permitirá grandes logros armónicos. En la "Física de los timbales" se patentizan las relaciones armónicas de los sonidos parciales con su fundamental, partiendo de un análisis comparativo con instrumentos de la misma familia; así, una membrana ideal no da la sensación clara de tono y un timbal bien afinado hace que se perciba un fundamental fuerte y dos o más armónicos. T. D. Rossing y sus colegas, de la Universidad de Illinois, han trascendido las tesis de Rayleigh para afirmar que los modos del timbal tienen frecuencias que se aproximan a las razones 1:1, 5:2. A excepción de la tabla india todavía no se han abordado las propiedades acústicas de los otros tambores.

Una revisión interpretativa de un instrumento (tal como se ofrece en "Interpretación de la trompeta barroca") puede variar y enriquecer la producción de armónicos aplicando la interacción de tres componentes: intérprete, boquilla e instrumento. Anteriormente la trompeta barroca sólo podía producir una serie discreta de armónicos sobre el sonido fundamental; desarrollando una técnica especial, el músico puede "inflexionar", variar los armónicos naturales respetando la afinación sin alterar el timbre del instrumento.

En el análisis sobre el funcionamiento acústico de las corrientes de "Física de los tubos de órgano" vemos cómo los armónicos del sonido de un tubo de órgano se generan por las interacciones entre corriente y labio del tubo; así, las resonancias de un tubo abierto se producen con las frecuencias para las que la longitud del tubo es un número múltiplo entero de semilongitudes de onda para el sonido en el aire. Un descubrimiento importante en Hubei (sur de China) confirma las intuiciones de especialistas modernos sobre las posibilidades tímbricas de los instrumentos orientales; el doble tono de altura distinta de las campanas aparecidas en Hubei permite una ejecución compleja de ritmo más rápido que las occidentales de tonos únicos y prolongados.

Coexisten con el sistema armónico unos elementos no tipificados: los formantes, cuya repartición irregular otorga una cualificación especial al timbre. Johan Sundgerg examina, en "La acústica de canto", el origen y desarrollo de los formantes, el origen y constitución del formante de canto. Su estudio se ciñe a las sonoridades de las vocales y excluye el efecto de las consonantes, elementos importantes en la sonoridad vocal.

En "Acústica de las tablas del violín", C. Hutchins, respondiendo a la pregunta de Savart "¿Qué sonidos deberían producir la tapa y el fondo de un violín antes de su ensamblaje?" desarrolla nuevos sistemas de medición vibratoria que correlacionan las características de cada par libre de tapa y fondo con la sonoridad y calidad tímbrica del instrumento montado. El violín terminado creará un nuevo juego de resonancias adicionales por acoplamiento entre la madera de la caja y los modos de vibración de la masa interior de aire.

El conjunto de cuatro capítulos que cubren el dominio electrónico sugiere un inagotable campo de experimentación acústica y tímbrica. Condicionado por los cambios y procesos evolutivos que experimentaba la música occidental, el ordenador ayuda a liberar los tradicionales parámetros que habían sustentado el sistema temperado. Los timbres podrían tratàrse unitariamente, las intensidades no dependerían del intérprete y las alturas forzarían el tradicional temperamento. Los métodos que se describen analizan la creación de nuevos sonidos mediante el equipo digital, abren un verdadero universo tímbrico y a la vez demuestran que estos procedimientos pueden imitar y estudiar los instrumentos tradicionales; el compositor puede emitir cualquier sonido imaginable e incluso algunos que no lo son.

P. Boulez describe las posibilidades compositivas y cualidades orquestales del ordenador. Mediante la ejemplificación de su composión "Répons" para seis solistas instrumentales, orquesta de cámara y procesadores de señales digitales en tiempo real, demuestra el nuevo campo artístico de la espacialización sonora siguiendo un juego antifonal de pregunta-respuesta. La velocidad del sonido en la sala de conciertos es proporcional a la intensidad, mientras los arpegios espacializados mantienen su resonancia.

El proceso digital de almacenar, procesar y generar audioseñales se aborda a fondo en "Reproducción digital del sonido", que expone las técnicas que permiten mejorar la calidad del sonido de otras grabaciones. Introduciendo modificaciones de intensidad, cambios de tiempo, adición sonora y gran variedad de sonidos obtendremos grabaciones de alta calidad como se da en el disco compacto. Otro material objeto de estudio es la voz humana en "Reconocimiento del habla por medio de ordenadores". Se ocupa de la posibilidad de crear máquinas que escuchen con el objeto de mejorar la comunicación hablada.

El interés científico de los artículos no se circunscribe a la especulación acústica. El "revival" actual de los instrumentos antiguos y la especialización en musicología obliga a un purismo interpretativo y a un mayor conocimiento científico de los instrumentos. Los estudios dedicados a las tablas del violín, la interpretación de la trompeta barroca y, especialmente, los hallazgos arqueológicos del juego de campanas chinas establecen una relación directa entre investigación científica e historia del arte.

Esta recopilación constituye una obra de gran interés didáctico. Merece atención especial la calidad ilustrativa de los gráficos: planos, diseños y fotografías con imágenes descompuestas de los instrumentos, diagramas de frecuencia claramente estructurados, figuras de resonancia, pautas y líneas nodales, gráficas de los modos, configuraciones vibratorias. Es notable la claridad expositiva, el rigor y la vertebración de los artículos. La traducción y la redacción en castellano compaginan la propiedad con la galanura expositiva. (C. R.)

PLANOS Y MAPAS HISPÁNICOS DE ARGELIA. SIGLOS XVI-XVIII, por Mikel de Epalza y Juan Bautista Vilar. Secretaría de Estado para la Cooperación Internacional y para Iberoamérica; Madrid, 1988.

Hablar del libro de M. de Epalza, catedrático de estudios árabes e islámicos de la Universidad de Alicante, y Juan Bta. Vilar, catedrático de historia contemporánea de la Universidad de Murcia, es tarea fácil, ya que dispone, en primer lugar, de un prólogo en el que Joaquín Pérez Villanueva, catedrático de historia moderna, nos hace un breve resumen de su contenido. La claridad y excelente presentación de la obra facilita el resto.

El libro, como su título indica, es un compendio de planos y mapas hispánicos –se entiende por "hispánicos" el hecho de encontrarse en bibliotecas o archivos españoles– de fortalezas y otras construcciones militares en la costa de Argelia. Consta de tres partes principales: una introducción con tres apartados; un catálogo de mapas y planos que sigue un modelo único de ficha de clasificación que se especifica en la introducción, y las fotos de planos, dibujos y esquemas que acompañan el catálogo. Los textos,

incluido el prólogo, son bilingües (castellano-francés) excepto las notas, que están sólo en francés porque en principio se pensaba publicar la obra únicamente en ese idioma.

En la introducción se hace una justificación del libro, basada principalmente en la cantidad de documentos sin clasificar existentes en el Archivo General de Simancas. Como sus autores indican, se trata de una catalogación, no de un estudio exhaustivo, y pretende sentar las bases para futuras investigaciones en la materia. Con todo, la cantidad de material clasificado y el tratamiento metodológico que recibe hacen que la obra supere los límites de una simple catalogación.

La metodología utilizada para clasificar los documentos se basa en un modelo único de ficha que contiene una descripción resumida de cada pieza, seguida de unos datos numerados del 1 al 10 y que indican respectivamente: número de orden dentro del catálogo, título abreviado, género de documento y fecha: origen y siglas en el archivo originario; título original; autor; escala; dimensiones del original; proyección, títulos y otros datos; diseño a pluma o impreso, colores, etc.; descripción y valor; documentación aneja y relación de la pieza con otros documentos del catálogo. Los autores han utilizado principalmente material de primera mano, sin emplear apenas bibliografía, prefiriendo en cambio inspirarse, en lo que a metodología se refiere, en los trabajos sobre las costas de Cádiz de Calderón y Quijano, y en los de Vallés y Sanchís sobre las costas de Valencia.

En la introducción histórica, subdividida en tres apartados, se habla en primer lugar de los tres siglos de presencia española en Argelia. A continuación, del sistema defensivo de Orán y Mazalquivir junto con la evolución de la arquitectura militar al compás de las nuevas tácticas bélicas, y, por último, de la estructura urbanística de la ciudad de Orán, su presidio y el fin de la dominación española.

La presencia española en el norte de Africa (la España africana) responde, según los autores, a un deseo imperialista español de extensión de la "Reconquista" al ámbito extrapeninsular –insuficiente a pesar de la expansión española en Europa y América– motivada por una inseguridad ante el peligro lejano del renacimiento islámico turco en Oriente, y el más cercano, representado por los moriscos en el interior de España. Nuestro país realiza un ataque a los estados más débiles del Magreb, provocando una petición de ayuda de éstos a los otomanos y dando lugar a un enfrentamiento entre los dos imperios. De este modo se repite el error cometido por Castilla en el siglo XI cuando atacó a los reinos de taifas y éstos se echaron en brazos de los almorávides, hundiendo con ello la prosperidad económica y cultural que representaban para la Península estos reinos, y rechazando cualquier política de buena vecindad. Esta idea del valor de las pequeñas taifas, y, más concretamente, de la de Valencia, la desarrollará más tarde Epalza en un artículo titulado *Estructura, Evolució i Esplendor de les Taifes Valencianes*, del libro: *En Torno al 750 Aniversario.– Antecedentes y Consecuencias*, Valencia, 1989. Con todo, tal como indican antes los autores, el miedo al "turco" y a su creciente poderío y expansión era muy grande, y por lo tanto se sobreentiende aquí la existencia de unas motivaciones puramente estratégicas. El establecimiento de puntos de defensa en el norte de Africa, en un momento en que Sicilia pertenecía a España, favorecía el control de la navegación por el Mediterráneo con dos puntos de vigilancia en orillas opuestas.

Los siguientes apartados abordan las principales plazas fortificadas del norte de Africa y su evolución bajo el dominio de España durante el período señalado. Entre éstas (Mazalquivir, Argel, Bujía, Bona, Arzew y Orán); se hace especial hincapié en la última, por la importancia del legado arquitectónico. Se citan numerosos nombres de españoles y europeos que trabajaron también en América y en la Península, y que en muchos casos pertenecían a familias de arquitectos o ingenieros militares.

El libro concluye con las 497 fichas de los documentos catalogados, algunas con su correspondiente foto, y con los índices acostumbrados en un trabajo científico. (F. C.)

THE AGE OF LAMARCK. EVOLUTIONARY THEORIES IN FRANCE 1790-1830, por Pietro Corsi. University of California Press; Berkeley, 1988. **LE JARDIN DES PLANTES A LA CROISÉE DES CHEMINS AVEC ANDRÉ THOUIN,** por Yvonne Letouzey; Editions du Muséum; París, 1989.

La ciencia durante la revolución francesa constituye todavía, para los historiadores, un tema tabú o un campo de minas, como se acaba de ver en los fastos celebrados en memoria de su segundo centenario. ¿Quién se atreve a escribir algo tan cierto como que nunca hasta entonces corrió tanta sangre entre los amantes de Atenea, sin desatar la furia de erinias y daimones? La débil expansión vocálica de una sinistra *avant la lettre* convertida en siniestra tiñe de lirismo pastoril los diálogos escalofriantes de Bernanos: listas de *proscrits* que huyen de París y, si pueden, de los confines del estado, encarcelamientos (Haüy, padre de la cristalografía), decapitación por guillotina (Lavoisier, padre de la química), miedo invencible que lleva a la muerte (Vicq d'Azir, padre de la anatomía comparada). Y, por supuesto, ocupación de esas vacantes forzosas por los ideológicamente afines, silencio de los que desaparecieron y exaltación de los mediocres propios. Escribe Thouin a su paso por Arras: "La plus petite des trois places est malheureusement trop célèbre par les exécutions atroces qu'y a fait faire Joseph Lebon. Arras est la patrie de Joseph Lebon, de Robespierre, de Damiens! Quels monstres pour une seule cité!".

Los hubo, empero, quienes supieron acomodarse a la nueva situación y, desprendiéndose de la peluca, se calaron el gorro frigio sin problemas de conciencia. Entre ellos, Lamarck y el propio Thouin. El primero ganó con el cambio; el segundo, ya bien instalado, afianzó su posición. Ambos habían sido protegidos del máximo representante del viejo régimen, Buffon, en lo económico y en lo profesional. La labor botánica de Lamarck, es decir, su *Flora francesa* y su participación en *La Enciclopedia metódica*, obedece a esa causa. Thouin estudió y sucedió a su padre en el Jardín Real de París con la intervención directa de Buffon, de quien andando el tiempo sería su mano derecha allí. Cuando el prolífico naturalista decide enviar a su hijo en viaje de formación por las principales instituciones europeas, manda que le acompañe Lamarck con cartas de recomendación de Thouin.

Lamarck, Thouin, Antoine-Laurent de Jussieu y nuestro Cavanilles forman una generación de botánicos, nacidos los cuatro en la década de los cuarenta del siglo XVIII, que merecería un estudio detenido. Los cuatro coinciden en París y llegan a la plena madurez científica en la década de los ochenta: Lamarck publica entonces sus colaboraciones en el *Diccionario*, como se aludía a la *Enciclopedia metódica*; Jussieu da por fin a la imprenta su esperado *Genera plantarum*; Thouin eleva el jardín a un esplendor desconocido, lo pone en relación con los cuatro puntos cardinales y prepara el catálogo; Cavanilles escribe sus *Disertaciones botánicas*. En el decenio inmediato siguiente, debido en buena parte a la revolución, van a seguir caminos dispares. Y es a partir de ese momento cuando empieza el desarro-

llo propiamente dicho del libro de Pietro Corsi.

¿Qué plan se ha trazado? Resulta difícil, reconoce, escribir algo nuevo sobre Lamarck tras los estudios de Richard Burkhardt, Giulio Barsanti, Leslie J. Burlingame, Toby Appel y Ludmilla J. Jordanova. Lo han desmenuzado literalmente en todas sus facetas: filosófica, científica, política y social. (Burkhardt, añadiríamos, por delante de todos, a pesar de que Corsi no cite incomprensiblemente sus trabajos posteriores a 1981.) La novedad de Corsi estriba en recrear la atmósfera. No es tanto Lamarck, que lo es, cuanto su circunstancia. Y no es tanto el Lamarck botánico de la primera flora gala, que no lo es en absoluto aquí, cuanto el Lamarck químico, geólogo y zoólogo. Filósofo, sobre todo. El que trueca su aplicación a la observación por el imaginativo que busca hilos conductores que enhebren toda la naturaleza, que liguen la materia inerte con la viva, que imbriquen los procesos físicos en los fisiológicos.

La circunstancia son los otros. Para entender su sistema, que el simplismo reduce a la evolución gradual mediante caracteres adquiridos a instancias del medio, versión simplista que corría desde el primer momento de sus *Recherches sur l'organisation des corps vivans et particulièrement sur son origine...*, de 1802, Corsi se remonta a los preliminares de la reforma de la historia natural que coinciden con la muerte de Buffon en 1788. En primer lugar, el desarrollo de la anatomía comparada, que obligaba a considerar los lazos o hiatos entre grupos de organismos. Luego, el progreso de la geología y la consolidación de la idea según la cual los fenómenos que ocurren hoy son los que se dieron en el pasado, sin necesidad de apelar a catástrofes.

La geología abarcaba el estudio de los minerales y de su formación. Lamarck, frente a otras hipótesis que atribuían su existencia a mecanismos de cristalización en un océano primitivo, consideraba los minerales fruto de la actividad orgánica. Sólo en el cuerpo de la planta o del animal lo que era elemental adquiría consistencia mineralógica. Con la geología estaban también relacionados sus trabajos de química, meteorología e hidrogeología. Combinaba, cierto es, disparates (rechazo de la nueva química) con intuiciones geniales (meteorología estadística).

Corsi se esfuerza por demostrar, ésa es la novedad del libro, que no todas las ideas eran suyas, ni mucho menos. Su brusco cambio, por ejemplo, de plana negación de la generación espontánea a la asunción de la misma lo debe a Delamétherie. La fuerza del ambiente en la modificación de las especies sería de Lacepède. Los propios ejemplos de adaptación pertenecerían al tratado de ornitología de Daudin. Pero si él no fue el innovador, sino el catalizador, la verdad es que tras la publicación de las *Recherches* y, sobre todo, su *Philosophie zoologique* (1809), la biología no sería ya la misma. Tuvo que enfrentarse a la figura imponente de Cuvier y su escuela. Vendría luego el debate entre Cuvier y Etienne Geoffroy Saint-Hilaire, minuciosamente descrito por Appel. Pero la idea de evolución había permeabilizado la historia natural y sólo había que esperar que Darwin tomara la antorcha.

En el quehacer científico no importa sólo las ideas creadoras, o los hombres del talante de Lamarck. Se necesita también la ayuda de los prácticos, capaces de llevar a la realidad el experimento diseñado, seguir el desarrollo de una reacción o de preparar un herbario para las clases. André Thouin (1747-1824), cuya correspondencia ha rescatado Yvonne Letouzey en el segundo libro de la reseña, compendia el modelo y lo lleva a su expresión arquetípica. No se trata de un mero capataz del Jardín Botánico de París que está a las órdenes de Buffon, sin otra formación que la empírica o aprendida junto a su padre, jefe también de cuadrilla.

Su misión es, en puridad, la de cuidar el jardín y asistir a Lemonnier o a los Jussieu, en las clases y en el ordenamiento del Jardín de acuerdo con el sistema del método natural, o clasificación por familias. Cuidar, nos da a entender, implica enriquecerlo con plantas de todos los continentes, aclimatarlas, ensayar nuevos cruces, enviar y recibir semillas de los principales jardines europeos (Leyden, Amsterdam, Viena, Upsala, Kew), promover expediciones (Dombey), relacionarse con los mejores botánicos (Linneo, Jacquin, Thunberg, Banks), crear su propio herbario (del que se beneficiarán lo mismo Lamarck que Cavanilles).

Es un capataz que en el viejo régimen pertenece a la Academia de Ciencias de París y, en el nuevo, es profesor de agricultura. Viaja por Europa, por Italia detenidamente y en Roma conoce a nuestro embajador Azara, quien posee, anota, una biblioteca pequeña pero muy selecta. Apunte que vale la pena resaltar en quien no tenía excesivo aprecio por nuestro país, sobre todo a causa del asunto Dombey y Gómez Ortega, sobre la propiedad de las especies traídas de Chile y Perú. (L. A.)

Apuntes

Para extraer las pautas del cambio climático antes de la existencia de registros meteorológicos, se acude a los llamados datos ''vicariàntes'', o indirectos. Lo que los científicos italianos no esperaban hallar era una joya documental: un pleito que duró desde la segunda mitad del siglo XIV hasta las postrimerías del XVIII por los pastos, lindes, servidumbres de paso y demás del valle de Avio, un valle de alta montaña del norte del país. Las declaraciones de los interesados aportan datos relativos a la duración del pastoreo, situación de las masas boscosas, estado de las aguas represadas y meses de nieve, amén del espesor de ésta.

Ecuación fundamental de la cosmología es la que iguala la velocidad de recesión de una galaxia al producto de una constante, la de Hubble, por la distancia en que se encuentra dicho objeto. De esa ecuación se infiere que el universo se expande. El valor de la constante no sólo determina la escala de tamaño del universo, sino también su razón o tasa de expansión. Si ese valor fuera alto, como demandan las últimas investigaciones, habría que ir buscando alguna forma exótica de materia obscura, porque la densidad de la materia bariónica ordinaria (nuclear) que admite el modelo vigente de nucleosíntesis cósmica quedaría muy por debajo de la densidad medida de la materia obscura.

La regularidad de los procesos vitales mueve a los fisiólogos animales a buscar en su dominio la posible simetría de los hallazgos de sus colegas los fisiólogos vegetales, y al revés. Hace un año apenas, descubrieron los primeros que el inositol 1,4,5-trifosfato constituía un segundo mensajero en las células animales, encargado de transmitir las señales hormonales recibidas en la superficie celular a los compartimentos intracelulares. ¿Ocurría algo parecido en las plantas superiores? Sí. Inyectada experimentalmente esa molécula se ha comprobado que aumenta el calcio intracelular, se cierran los estomas y se inactivan los canales potasio.

La explicación estereotipada en los libros de texto y enseñada en las clases sobre el ciclo del carbono en el océano es la siguiente: la materia orgánica descompuesta, o particulada, en su vía de hundimiento desde la superficie donde el fitoplancton fija el CO_2 hasta el suelo marino aprovecha, para su oxidación, un 10 por ciento de ese carbono fijado. La nueva explicación, que comienza a consolidarse, corrige: la vía principal de transporte de materia orgánica a través de la columna de agua no implica compuestos orgánicos particulados, sino disueltos; dicho de otro modo, la parte del león del oxígeno que se consume en el interior del océano no se usa para oxidar la materia orgánica particulada, sino la disuelta.

La elegancia y simplicidad son las notas buscadas por toda teoría que se precie. Pero no bastan, ni siquiera para dar cuenta de la formación de algo tan próximo como la Luna. Desde las misiones Apolo se han ido asentado dos hipótesis principales: el satélite nació por captura de materiales que se fraccionaban a su paso por el límite gravitatorio de Roche (dentro de los 2,5 radios terrestres) y la teoría del impacto, de acuerdo con la cual la Luna se formó por choque de un objeto del tamaño de Marte con la Tierra en las últimas fases del proceso de acreción de nuestro planeta. Dentro de esa segunda hipótesis, la Luna habría nacido del manto terrestre, pues tiene su baja densidad y falta de elementos volátiles y posee similar composición. En particular, muy parejas concentraciones de vanadio, cromo y manganeso. Demasiado sencillo para ser cierto, opinan otros. A modo de contraejemplo: la concentración de manganeso volátil en la Luna es mayor que en la Tierra, lo opuesto a lo que se deduce de la historia supuesta de una y otra.

Y hablando de elegancia y sencillez, un aviso para navegantes jóvenes en el mar de la investigación. Léase con detenimiento el título del trabajo más citado en la década de los ochenta: ''El papel que desempeña la proteína quinasa C en la transducción de señales de la superficie celular y en la producción de tumores''. O lo que es lo mismo, cómo ir en corto y por derecho a una cuestión central. Su autor, Yatusomi Nishizuka, de la Universidad de Kobe, lo publicó en *Nature*.

Las arañas son expertas en el bies, la vainica y el punto de cruz. No decoran ningún tapete o respaldo de sillón, por supuesto. Esos motivos remedan los patrones ultravioletas de muchas flores. Engañados por lo que creen son nectarios, los insectos, en los que como es sabido la luz ultravioleta constituye un componente clave de su visión, caen así presas en sus telas.